



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

# Desarrollo de una herramienta de análisis multi- criterio para el soporte de toma de decisiones en el aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá

Trabajo de Grado

---

Estudiante: Sandra Lorena Galarza Molina – Ingeniera Civil  
Director: Andrés Eduardo Torres – Ingeniero Civil, M.Sc. y PhD en Ingeniería Civil  
11 de junio de 2011



## Contenido

1	INTRODUCCIÓN .....	8
2	MARCO TEÓRICO .....	12
2.1	MÉTODOS DE ANÁLISIS MULTI-CRITERIO .....	12
2.2	MÉTODOS ELECTRE .....	16
2.2.1	ELECTRE I .....	16
2.2.2	ELECTRE II .....	16
2.2.3	ELECTRE III .....	17
2.2.4	ELECTRE IV .....	17
2.2.5	ELECTRE TRI.....	17
2.2.6	ELECTRE II – GENERALIDADES .....	18
2.3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA LA GENERACIÓN DE VALORES ALEATORIOS Y CONSTRUCCIÓN DE CRITERIOS DE EVALUACIÓN .....	22
2.3.1	Conceptos Estadísticos.....	22
2.3.2	Conceptos Hidrológicos .....	24
2.3.3	Conceptos Financieros - Índices de bondad de un proyecto .....	25
2.4	SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE .....	25
2.4.1	Pavimentos Permeables .....	26
2.4.2	Jardines de Bioretención.....	29
2.4.3	Humedales artificiales.....	30
3	MATERIALES Y MÉTODOS .....	32
3.1	DESCRIPCIÓN DEL CAMPUS DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA SEDE BOGOTÁ.....	32
3.2	DATOS DEL CAMPUS PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA SEDE BOGOTÁ .....	33
3.3	DATOS HIDROLÓGICOS.....	34
3.4	CRITERIOS PARA EVALUAR LAS ALTERNATIVAS.....	34
3.5	ENCUESTA .....	35
3.6	MATLAB ® .....	37
4	HERRAMIENTA DESARROLLADA CRIDE .....	38
4.1	CRIDE – OPCIÓN 0.....	39
4.2	CRIDE – OPCIÓN 1.....	39



4.3	CRIDE – OPCIÓN 2.....	42
4.4	CRIDE – OPCIÓN 3.....	43
4.5	CRIDE – OPCIÓN 4.....	43
4.6	CRIDE – OPCIÓN 5.....	45
4.7	RUTINAS QUE CONFORMAN A CRIDE.....	45
5	RESULTADOS OBTENIDOS AL APLICAR LA HERRAMIENTA DESARROLLADA.....	49
5.1	METODOLOGÍA PROPUESTA .....	49
5.1.1	Definición de cuencas en el campus de la PUJ sede Bogotá .....	49
5.1.2	Pre-dimensionamiento de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible .....	50
5.1.3	Determinación de la Demanda y la Oferta de agua en el Campus .....	52
5.1.4	Construcción de Escenarios - Alternativas.....	52
5.1.5	Estimación de los Criterios.....	54
5.2	RESULTADOS OBTENIDOS.....	59
5.2.1	CRIDE – Opción 0 .....	61
5.2.2	CRIDE – Opción 1 .....	62
5.2.3	CRIDE – Opción 2 .....	64
5.2.4	CRIDE – Opción 3 .....	65
5.2.5	CRIDE – Opción 4 .....	67
5.2.6	CRIDE – Opción 5 .....	68
5.2.7	CRIDE: Pesos definidos por los Encuestados .....	69
5.2.8	CRIDE– Evaluado Robustez, Redundancia de Criterios y Sensibilidad de los pesos.....	81
6	CONCLUSIONES .....	85
7	RECOMENDACIONES .....	88
8	REFERENCIAS.....	90

## Tablas

Tabla 1. Fases del proceso del AMC (Adaptado de: Hajkowicz y Collins, 2006) .....	12
Tabla 2. Clasificación directa (Adaptado: página 174-175 de Smith <i>et al.</i> , 2000) .....	20
Tabla 3. Clasificación indirecta (Adaptado: página 175 de Smith <i>et al.</i> , 2000) .....	21
Tabla 4. Categoría de carga (Adaptado de: Interpave, 2008).....	28
Tabla 5. Cuadros de diseño para los Sistemas Tipo C (Adaptado de: Interpave, 2008).....	28
Tabla 6. Ajuste de la altura para CBR bajos (Adaptado de: Interpave, 2008) .....	29



Tabla 7. Criterios definidos para la evaluación de las alternativas (Fuente: elaboración propia).....	35
Tabla 8. Resultados encuesta para la ponderación de criterios (Fuente: elaboración propia).....	36
Tabla 9. Descripción de los archivos y datos empleados en CRIDE (Fuente: elaboración propia).....	48
Tabla 10. Áreas aferentes de cada una de las cuencas y sistemas alternativos definidos para cada cuenca (Fuente: elaboración propia).....	50
Tabla 11. Dimensiones de los Jardines de Bioretención (Fuente: Elaboración propia).....	51
Tabla 12 Dimensiones de los Pavimentos Permeables (Fuente: Elaboración propia).....	51
Tabla 13 Dimensiones de los Humedales artificiales (Fuente: Elaboración propia).....	51
Tabla 14. Cuencas con los edificios a suministrar agua, área y coeficiente de escorrentía C (Fuente: elaboración propia)...	53
Tabla 15. Eficiencia de retención de contaminantes de los SUDS (Adaptado de: CIRIA, 2004; PGCo, 2009; Kadlec et al., 2009).....	55
Tabla 16. Aspectos claves de operación y mantenimiento de los SUDS (Adaptado de: CIRIA, 2007).....	56
Tabla 17. Matrices de Posibles Soluciones, evaluación de cada de los 6 Escenario (Ei) respecto a cada criterio, unidades expresadas en fracciones excepto para el criterio 7 el cual se expresa en años (Fuente: elaboración propia).....	59
Tabla 18. Distribución y sentido de preferencia de los criterios (Fuente: elaboración propia).....	60
Tabla 19. Pesos de los Criterios (Fuente: elaboración propia).....	61
Tabla 20. Resumen de las posiciones de los escenarios en cada opción de CRIDE (Fuente: elaboración propia).....	69

## Figuras

Figura 1. Matriz de concordancia (Fuente: elaboración propia).....	19
Figura 2. (a) Grafo fuerte y (b) grafo débil (Fuente: elaboración propia).....	20
Figura 3. Algoritmo de clasificación (Adaptado de: Smith <i>et al.</i> , 2000).....	21
Figura 4. Sección transversal de un Pavimento Permeable (Adaptado de: Interpave, 2008).....	27
Figura 5. Esquema de humedal a flujo libre (FWS) (Adaptado de: Kadlec <i>et al.</i> , 2009).....	30
Figura 6. Distribución del área total de campus (Adaptado de: MN&A, 2010).....	32
Figura 7. División del campus de la PUJB por zona alta, media y baja (Fuente: Adaptado Google, 2010).....	33
Figura 8. Curvas IDF de las Estación San Luis (Adaptado de: EAAB, 2005).....	34
Figura 9. Definición de pesos de los criterios de evaluación de las alternativas, para cada uno de los participantes (Fuente: elaboración propia).....	36
Figura 10. Promedios de los Pesos de los Criterios, Promedio todos (el promedio con todas las respuestas), promedio Recursos Físico (promedio con sólo los participantes de la Dirección de Recursos Físicos de la Universidad), Promedios Externos (promedio con los participantes externos) (Fuente: elaboración propia).....	37
Figura 11. Ejemplo de la escala de las evaluaciones de cada una de las alternativas (A-1, A-2, A-3, A-4 y A-5) con respecto a los criterios C-1, C-2, C-3, C-4 y C-5 (Fuente: elaboración propia).....	39
Figura 12. Opción 0 de CRIDE, datos de entrada y salida (*ver figura 22) (Fuente: elaboración propia).....	40
Figura 13. Ejemplo de los valores máximos, mínimos y promedios evaluando a las alternativas (A-1, A-2, A-3, A-4 y A-5) con respecto al criterio C-1. Entre el rango expuesto por la línea punteada se generan los valores aleatorios (Fuente: elaboración propia).....	40
Figura 14. Opción 1 de CRIDE, datos de entrada y salida (*ver figura 22) (Fuente: elaboración propia).....	41



Figura 15. Ejemplo de las probabilidades de cada alternativa en ocupar los puestos, la mejor alternativa es la A2, seguida por la A1, luego la A4 y ocupando el último puesto la A3 (Fuente: elaboración propia).....	41
Figura 16. Ejemplo de los valores máximos, mínimos y promedios de los pesos de cada uno de los criterios (C-1, C-2, C-3 C-4 y C-5). Entre el rango expuesto por la línea punteada se generan los valores aleatorios (Fuente: elaboración propia) .....	42
Figura 17. Opción 2 de CRIDE, datos de entrada y salida (*ver figura 22) (Fuente: elaboración propia) .....	42
Figura 18. Opción 3 de CRIDE, datos de entrada y salida (*ver figura 22) (Fuente: elaboración propia) .....	43
Figura 19. Ejemplo de los valores de los Umbrales C1, C2 y C3. Entre el rango expuesto por la línea punteada se generan los valores aleatorios (Fuente: elaboración propia) .....	44
Figura 20. Opción 4 de CRIDE, datos de entrada y salida (*ver figura 22) (Fuente: elaboración propia) .....	44
Figura 21. Opción 5 de CRIDE, datos de entrada y salida (*ver figura 22) (Fuente: elaboración propia) .....	45
Figura 22. Subrutinas utilizadas por CRIDE (Fuente: elaboración propia) .....	46
Figura 23. Cuenca definidas en el campus de la PUJ (Adaptado de: Dirección de Recursos Físicos, 2010).....	49
Figura 24. Posible ubicación de los SUDS en el Campus (círculos rojos) (Adaptado de: Dirección de Recursos Físicos, 2010) .....	51
Figura 25. Resultados con la rutina CRIDE – Opción 0 (Fuente: elaboración propia).....	62
Figura 26. Puesto más frecuente de cada Escenario (Opción) vs Número de simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	63
Figura 27. Resultados con la rutina CRIDE – Opción 1 Matriz de Posibles Soluciones aleatoria para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	63
Figura 28. Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz de Posibles Soluciones aleatoria (Fuente: elaboración propia) .....	64
Figura 29. Resultados con la rutina CRIDE, Pesos aleatorios para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	65
Figura 30. Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Pesos aleatorios (Fuente: elaboración propia) .....	65
Figura 31. Resultados con la rutina CRIDE – Opción 3, Matriz de Posibles Soluciones y Pesos aleatorios para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	66
Figura 32. Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz de Posibles Soluciones y Pesos aleatorios (Fuente: elaboración propia) .....	66
Figura 33. Resultados con la rutina CRIDE – Opción 4, Umbrales de Concordancia aleatorios, Matriz de Posibles Soluciones y Pesos promedio para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	67
Figura 34. Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz de Posibles Soluciones y Pesos aleatorios (Fuente: elaboración propia) .....	67
Figura 35. Resultados con la rutina CRIDE – Opción 5, Matriz de Posibles Soluciones, Pesos y Umbrales de Concordancia aleatorios para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	68
Figura 36. Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz de Posibles Soluciones, Pesos y Umbrales de Concordancia aleatorios para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	68
Figura 37. Resultados con la rutina CRIDE, Pesos de los encuestados (Fuente: elaboración propia) .....	70
Figura 38. Resultados con la rutina CRIDE-, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 1, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	70
Figura 39. Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el Participante 1, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	71
Figura 40. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el Participante 2, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	71



Figura 41 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el Participante 2, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	71
Figura 42. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 3, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	72
Figura 43 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el Participante 3, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	72
Figura 44. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 4, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	73
Figura 45 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 4, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	73
Figura 46. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 5, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	73
Figura 47 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 5, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	74
Figura 48. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definido por el participante 6, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	74
Figura 49 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definido por el participante 6, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	75
Figura 50. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definido por el participante 7, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	75
Figura 51 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 7, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	75
Figura 52. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 8, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	76
Figura 53 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definido por el participante 8, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	76
Figura 54. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 9, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	77
Figura 55 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por participante 9, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	77
Figura 56. Resultados de la ejecución CRIDE Matriz de Posibles Soluciones y Umbrales Aleatorios, Pesos de los Criterios Definidos por los Encuestados.....	78
Figura 57. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el Grupo Dirección Planta Física, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	78
Figura 58 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por Grupo Dirección Planta Física, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	79
Figura 59. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el Grupo de Expertos, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	79
Figura 60 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el Grupo de Expertos, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia).....	79
Figura 61. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz de Posibles Soluciones y Umbrales de Concordancia aleatorios, y Pesos definidos por Grupos aleatorios (Fuente: elaboración propia) .....	80
Figura 62. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz de Posibles Soluciones y Umbrales de Concordancia aleatorios, y Pesos definidos por Participantes Virtuales aleatorios para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	81

Figura 63. Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz de Posibles Soluciones y Umbrales de Concordancia aleatorios, y Pesos definidos por Participantes Virtuales aleatorios para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia) .....	81
Figura 64. Puestos de los Escenarios retirando uno a uno los criterios. Los cuadros azules muestran la ejecución de referencia: 1 puesto E5, 2 puesto E6, 3 puesto E4, 4 puesto E3, 5 puesto E2 y 6 puesto E1 (Fuente: elaboración propia)....	82
Figura 65. Indicador de Redundancia (Fuente: elaboración propia).....	83
Figura 66. Puestos de los Escenarios retirando los criterios 2 y 3, 2 y 4, 5 y 7, y 5y8. (Fuente: elaboración propia).....	84
Figura 67. Puestos de los Escenarios dejando uno a uno los pesos de cada criterio. Los cuadros azules muestran la ejecución de referencia: 1 puesto E5, 2 puesto E6, 3 puesto E4, 4 puesto E3, 5 puesto E2 y 6 puesto E1 (Fuente: elaboración propia) .....	84

## **Anexos**

Anexo 1 Datos hidrológicos

Anexo 2 Formato encuesta

Anexo 3 Pre-dimensionamiento SUDS y costos de generales

Anexo 4 Determinación de los criterios de los escenarios

Anexo 5 Código de la herramienta desarrollada CRIDE



*Dedicatoria*

*A mi familia y amigos, gracias por contar con su compañía*

*Agradecimiento*

*A todos aquellos que me brindaron su guía y apoyo, especialmente al ingeniero  
Andrés Torres*

## 1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población urbana, y por ende el aumento de la demanda de agua, ha generado una presión hídrica que –en muchas ciudades del mundo– se ha vuelto crítica debido a la poca oferta hídrica natural (Hatt *et al.*, 2006). Lo anterior ha generado una atención cada vez mayor en el aprovechamiento del agua lluvia como fuente potencial de agua, inicialmente excluyendo la producción de agua potable (Hatt *et al.*, 2006). Esta técnica tiene la ventaja que ha conocido una aceptabilidad social mayor frente a otras fuentes alternativas como el reciclado de las aguas usadas o la desalinización del agua de mar (Coombes y Mitchell, 2006). Por otra parte, se ha demostrado que según el lugar y, por consiguiente, la oferta hídrica natural, el volumen anual de agua lluvia transportada por los sistemas de saneamiento urbano puede ser similar o incluso superar la demanda anual necesaria para ciertos usos (Mitchell *et al.*, 2003; Lara Borrero *et al.*, 2007). Los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias integran cuatro componentes principales (Fewkes y Butler, 2000; Hatt *et al.*, 2006; Mitchell *et al.*, 2005; Schlüter y Gillespie, 2007; Mitchell *et al.*, 2008): captación, tratamiento, almacenamiento y distribución. Dentro de estos componentes, el tratamiento representa el reto más importante (Hatt *et al.*, 2006). Típicamente, hoy en día las preguntas sobre aprovechamiento de aguas lluvias a las que se quiere dar respuesta por medio de investigaciones o estudios de ingeniería son (Mitchell *et al.*, 2008): ¿Cuánta agua lluvia puede ser aprovechada?; ¿Qué tan confiable es esa fuente de agua alternativa? y ¿Cuáles son los requerimientos en infraestructura para lograr el aprovechamiento?

En el ámbito nacional se han desarrollado algunos trabajos de investigación, que contemplan el aprovechamiento de aguas lluvias para el abastecimiento de poblaciones (Caicedo Mosquera E. y Sánchez L., 2001; Pino Mosquera J. y Rodríguez Valencia E., 1997; Montoya Araújo F. y Suárez Esparragoza G., 1987) y para usos que no requieren agua potable –descarga de sanitarios y orinales, riego de jardines y limpieza de automotor– (Bogoya Jerez A. y Saldarriaga Valderrama J., 2008; Ballén Suárez J. y Galarza García M., 2004; Agudelo Quintero M. y Sanabria Nuñez J., 1999). Ballén y Galarza (2004) realizaron un trabajo teórico-práctico de aprovechamiento de aguas lluvias, el cual consistió en el análisis de las experiencias y técnicas desarrolladas por otros países que pudiesen ser utilizadas en Colombia y en el diseño de alternativas (instalaciones hidráulicas) en 3 ciudades de Colombia. Los autores concluyeron que la factibilidad del aprovechamiento del agua lluvia depende de cinco variables la precipitación de la zona, el área de la cubierta, la dotación a suplir, el precio por metro cúbico de agua y la inversión necesaria para la construcción y mantenimiento de los sistemas. A nivel financiero, el aprovechamiento del agua lluvia se ajusta mejor a desarrollos de tipo comunitario y no individual.

Adicionalmente en la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá, dentro del marco de Plan de Manejo Ambiental, se concibió un proyecto a través del cual se buscaba analizar la viabilidad económica y técnica del aprovechamiento del agua lluvia como una alternativa para el riego y el lavado de zonas duras y fachadas del campus de su sede en Bogotá. Este proyecto estuvo liderado por el Grupo de Investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y del Ambiente, mediante Tecnologías de Bajo Impacto, de la misma Universidad, y se inscribió en un estudio más amplio que buscaba determinar la cantidad de agua del campus de la Universidad potencialmente reutilizable, su calidad y posibles usos y

la infraestructura necesaria para tal fin. Los primeros resultados demuestran la posibilidad de utilizar el agua lluvia para algunos usos, desde el punto de vista de la cantidad de agua. Sin embargo, el número y el tipo de análisis de agua que se realizaron no fueron suficientes para concluir de manera definitiva la adaptabilidad del agua lluvia disponible para su uso dentro del campus, desde el punto de vista sanitario (Lara Borrero *et al.*, 2007). Para conocer la calidad de las aguas lluvias en el campus se realizaron campañas de medición y se determinaron los posibles usos (Estupiñán *et al.*, 2011; Torres O., 2011).

Adicionalmente se determinaron los requerimientos de infraestructura para el aprovechamiento sostenible del agua lluvia en el campus demostraron que se podría suministrar una demanda máxima del 14% de agua en el campus, requiriendo grandes inversiones y un cambio en el modelo cultural del aprovechamiento del agua. Se generaron dos importantes subproductos, el inventario de usos de agua dentro del campus y un completo análisis de la calidad de las aguas lluvias en el campus (Estupiñán y Zapata, 2010).

Debido a la variabilidad de las características de los eventos lluviosos, de los usos del agua dentro del campus y de los intereses económicos y ambientales de la Universidad, una toma de decisiones objetiva es compleja, al igual que para cualquier toma de decisiones en gestión de recursos hídricos.

Adicionalmente, los resultados obtenidos en consecuencia a una toma de decisiones son difíciles de evaluar objetivamente, son imperceptibles, y pueden incluir elementos de diferente naturaleza tales como la biodiversidad, la recreación, el paisaje y la salud humana. Para una mejor toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico, esta diversidad hace que sea necesario utilizar una metodología que evalúe cada posible opción e incorpore estructura, transparencia, capacidad de auditoría y rigor a las decisiones. Una de las opciones encontradas por varios investigadores es el Análisis Multi-Criterio (AMC) para la toma de decisiones en la gestión del agua (Hajkowicz y Higgins, 2006).

Cuando se busca una toma de decisiones grupal lo ideal es obtener un consenso para lograr unidad y apropiación, y así evitar una simple votación (Ben-Arieh y Chen, 2006). Lograr lo anterior usualmente requiere de grandes esfuerzos por parte de las organizaciones y puede generar desgastes importantes del grupo decisor (Doumpos y Zopounidis, 2004). Adicionalmente, muchas de las decisiones que afectan directamente a un grupo de personas involucran el examen de un conjunto de posibles alternativas a través de un conjunto de criterios, para lo cual es necesario que el grupo decisor cuente con herramientas para estar lo suficientemente ilustrados de manera a tomar la decisión más adecuada (Doumpos y Zopounidis, 1998). ¿Pero cómo lograr que esa toma de decisiones tenga un carácter más racional y menos emocional?, ¿Cómo lograr consenso sin generar desgaste?

A nivel internacional se ha encontrado que para dar soporte a la toma de decisiones se han utilizado las técnicas de Análisis Multi-Criterio (AMC), las cuales han sido desarrolladas a partir de los años 60's (Roy, 1968). Desde entonces dichas técnicas han sido objeto de numerosas investigaciones en diversos campos como la medicina, la ingeniería, finanzas y economía, entre otros (Araújo de Castro *et al.*, 2007; Belacel, 2000; Chen y Hung, 2009; Doumpos y Zopounidis, 1998; Hajkowicz y Collins, 2006; Uzoka *et al.*, 2011).

El AMC emplea la comparación entre las alternativas por medio de puntuaciones de éstas frente a cada uno de los criterios (Belacel, 2000), las cuales pueden ser cualitativas o cuantitativas (Smith *et al.*, 2000). Diversos autores (Ben-Arieh y Chen, 2006; Carlsson y Fuller, 2000; Delgado *et al.*, 1998; Weinhardt y Seifert, 2009; Xu, 2005) se han concentrado en la inclusión de etiquetas lingüísticas para la toma de decisiones mediante la evaluación de las alternativas de forma cualitativa, dado que con frecuencia para los expertos resulta difícil expresar sus preferencias mediante números exactos.

La toma de decisiones en grupo es una actividad frecuente e importante en las organizaciones. La ayuda a la toma de decisiones es la actividad que permite obtener herramientas para encontrar respuestas a las preguntas formuladas por las partes interesadas en un proceso de decisión, que se efectúa mediante el uso de modelos explícitos pero no necesariamente formalizados. Estas herramientas ayudan a ilustrar las posibles soluciones y a generar una recomendación que aumente la coherencia entre la evolución del proceso y los objetivos de las partes interesadas. La palabra “recomendación” se utiliza para que tanto el analista como la persona o el grupo de personas que toman la decisión estén enterados que estos últimos están en libertad de seguir o no las sugerencias propuestas (Roy, 2005).

Hajkowicz y Collins (2006) revisaron 134 publicaciones de 34 países que aplicaban el AMC en la gestión del recurso hídrico, con el objetivo de entender el desarrollo y el estado actual de dicha herramienta en esta disciplina. En este estudio se identificaron ocho clases de aplicaciones del AMC: gestión de cuencas y acuíferos, selección de infraestructura, valoración de proyectos, optimización de recursos hídricos limitados, política del agua y planificación de la oferta, gestión de la calidad del agua y de áreas marinas protegidas. Adicionalmente, Hajkowicz y Collins (2006) concluyeron que la mayoría de aplicaciones revisadas se encuentran entre las siguientes clases: (i) política del agua y planificación de la oferta y (ii) selección de infraestructura. Esto se debe a que estas decisiones generan impacto a numerosos actores involucrados e implican el manejo de objetivos múltiples (Hajkowicz y Collins, 2006).

Por otra parte, a nivel nacional la mayoría de los métodos de AMC no han sido tenidos en cuenta para la toma de decisiones en el manejo de recursos hídricos. Sin embargo, se han desarrollado algunos esfuerzos puntuales como por ejemplo para apoyar la toma de decisiones en tecnologías para la potabilización en los municipios colombianos (Lara Borrero *et al.*, 2004) o para apoyar la toma de decisiones en abastecimiento de agua, saneamiento básico e higiene (Villegas *et al.*, 2009; Rojas Potes y Madera Parra, 2006; Aponte Reyes y Restrepo Tarquino, 2005; Galvis A. *et al.*, 2005; Vargas Franco y Galvis Castaño, 1996; Restrepo Tarquino y Galvis Castaño, 1995; Chávez Alfonso *et al.*, 1993). La falta de utilización de dichos métodos puede deberse al desconocimiento de éstos y sus bondades y/o a problemas en su puesta en marcha en nuestro medio (Galvis, 2005).

Para la fase de evaluación de los proyectos, generalmente se utilizan métodos que articulan la estructura de preferencia del decisor como los métodos de clasificación (por ejemplo Electre III). Sin embargo, el análisis del uso de estos tipos de sistemas demuestra que es preferible el desarrollo de herramientas específicas (Baptista *et al.*, 2004). Esta evidencia podría generalizarse para cualquier fase de los proyectos que involucran toma de decisiones. Por consiguiente, se hace necesario el desarrollo de una herramienta específica para la toma de decisiones teniendo en cuenta múltiples criterios e



involucrando a los diferentes actores implicados (múltiples objetivos) en el aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la PUJB.

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar una herramienta de análisis multi-criterio para el soporte de toma de decisiones en el aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la PUJB. Para lograr este objetivo se plantearon los siguientes objetivos específicos: (i) Realizar una revisión bibliográfica sobre los métodos de análisis multi-criterio para el soporte de toma de decisiones en la gestión de aguas lluvias; (ii) Desarrollar y programar un método de análisis multi-criterio específico para el aprovechamiento de las aguas lluvias en el campus de la PUJB; (iii) Calibrar la herramienta desarrollada a partir de su aplicación en un ambiente de prueba.

En el segundo capítulo se encuentra el marco teórico, en el tercer capítulo los materiales y métodos, los resultados y la discusión de éstos en el cuarto capítulo, las conclusiones y recomendaciones se presenta en los capítulos cinco y seis respectivamente.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 MÉTODOS DE ANÁLISIS MULTI-CRITERIO

El análisis multi-criterio (AMC) se ha venido desarrollando para apoyar el proceso de toma de decisión ya que éste se basa en diferentes criterios. El método de AMC se basa en modelos de decisión que contienen diferentes posibles soluciones que requieren ser evaluadas o clasificadas por la persona o el grupo de personas que toman la decisión, diferentes criterios que generalmente son evaluados en diferentes unidades y un conjunto de medidas de desempeño para cada posible solución respecto a cada uno de los criterios. Existen diferentes términos para referirse al análisis multi-criterio (AMC), tales como soporte a la decisión con múltiples objetivos (SDMO), atributos múltiples para la toma de decisiones (AMTD) y análisis multi-criterio de decisión (AMCD) (Hajkowicz y Collins, 2006).

Generalmente, al enfrentarse con un problema en la toma de decisión se pueden efectuar cuatro tipos de análisis (Roy, 1968):

- Identificar la mejor alternativa o seleccionar un grupo con las mejores alternativas,
- Determinar el orden (ranquin) de la mejor a la peor de las alternativas,
- Clasificar las alternativas en grupos homogéneos predefinidos
- Identificar las principales características de diferencia de las alternativas y describirlas en base a estas características.

Varios autores (Howard AF., 1991; RAC, 1992) han explicado el proceso del AMC, el cual generalmente contiene las fases descritas en la tabla 1 (Hajkowicz y Collins, 2006).

Tabla 1. Fases del proceso del AMC (Adaptado de: Hajkowicz y Collins, 2006)

FASE	DESCRIPCIÓN
Escoger las opciones de decisión (alternativas)	Normalmente existe un número finito de alternativas que requieren ser evaluadas y ordenadas de mejor a peor
Escoger los criterios de evaluación	Los criterios son usados para medir el desempeño de las alternativas.
Obtener medidas de desempeño para la matriz de evaluación	Estos valores pueden ser obtenidos de expertos en el tema o de otros modelos ambientales o económicos.
Estandarizar las mediciones	Los problemas de AMC siempre contendrán criterios medidos en unidades distintas. Por lo tanto, es necesario transformar las mediciones para que puedan compararse entre sí. Usualmente se utiliza un rango entre 0 y 1, para que los criterios puedan ser combinados en la misma función de utilidad.
Ponderar los criterios	Es raro que todos los criterios tengan la misma importancia para los tomadores de decisiones. Existen una variedad de métodos para ponderar los criterios.
Determinar el orden (ranquin) de las opciones	En esta fase las ponderaciones de los criterios se combinan con las medidas de desempeño para que cada alternativa alcance una medida global de su rendimiento.



FASE	DESCRIPCIÓN
Realizar un análisis de sensibilidad	La variación sistemática de las ponderaciones, de las medidas de desempeño y de los algoritmos para la determinación del orden, puede mostrar dónde el modelo necesita fortalecimiento y solidez de los resultados, dados unos supuestos de entrada.
Tomar la decisión	El objetivo del método de AMC es informar la decisión, pero no tomar la decisión final.

En general, el proceso descrito en la Tabla 1 es iterativo, dejando la posibilidad de abordar varias veces cualquier etapa a medida que se va desarrollando el análisis.

Desde la década de 1960 se han desarrollado diversas técnicas para resolver el problema de AMC. Más recientemente, el estudio realizado por Hajkowicz y Collins (2006), en el cual revisaron 134 publicaciones de 34 países que aplicaban el AMC en la gestión del recurso hídrico, permiten clasificar las técnicas de AMC en:

- i. Métodos de funciones de valor multi-criterio: los métodos más comunes son la suma ponderada y la multiplicación ponderada. Estos métodos se basan en la ponderación de cada uno de los criterios, los cuales son multiplicados por el desempeño de cada alternativa. Se agrupan los resultados parciales de cada una de las alternativas, se suman o se multiplica y esta es la puntuación global de cada opción. La alternativa escogida será la de mejor puntuación global.
- ii. Métodos de relaciones de superación: los métodos PROMETHEE (Brans *et al.*, 1986) (de sus siglas en inglés: Preference Ranking Organization MeTHod for Enrichment Evaluations) y ELECTRE (Roy, 1968; Figueira *et al.*, 2005) (de sus siglas en francés: ELimination Et Choix Traduisant la Réalité) son los enfoques comúnmente más utilizados. Estos métodos relacionan las alternativas utilizando las relaciones llamadas "de mejor rango" para seleccionar la alternativa más satisfactoria para el tomador de decisión (Smith Q. R. *et al.*, 2000), aplicando una especie de función de utilidad que contiene criterios ponderados para determinar la cantidad de alternativas que superan a otras. En el transcurso de los años han habido considerables variaciones a los métodos PROMETHEE y ELECTRE.
- iii. Métodos de distancia a la alternativa ideal: este enfoque identifica valores ideales y anti-ideales de cada criterio, luego identifican las alternativas que están cercanas a los valores ideales y lejanas a los valores anti-ideales. La alternativa seleccionada debe tener la distancia más corta posible hacia la solución ideal y estar lo más lejos posible de la anti-ideal. Las técnicas más comunes de este método son programación de compromiso (Zeleny, 1973 y Abrishamchi *et al.*, 2005) y TOPSIS (Lai *et al.*, 1994).
- iv. Comparaciones por pares: este método consiste en comparar la alternativas o criterios de a pares, lo cual se efectúa en términos de "razones o tasas de preferencia" si se trata de alternativas o de "razones de importancia" si se trata de criterios. Con las comparaciones se pueden obtener la ponderación de los criterios y las puntuaciones de las opciones de decisión. La técnica más ampliamente usada es el proceso analítico jerárquico o AHP (de sus siglas en inglés: Analytic Hierarchy Process) (Saaty, 1987). Otros métodos son el proceso de análisis de red ANP (de sus siglas en inglés: Analytic Network Process) (Saaty, 2005) y MACBETH (de sus siglas en inglés: Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation TechNique) (Bana e Costa *et al.*, 2005).

- v. Análisis de conjuntos borrosos: la teoría de los conjuntos borrosos está basada en la transición gradual del ítem a evaluar de una clase a otra. Estos elementos pueden pertenecer parcialmente a varios conjuntos. El análisis de conjuntos borrosos puede ser empleado para otras técnicas de análisis multi-criterio.
- vi. Métodos adaptados de los existentes: la capacidad para crear métodos de AMC a partir de la adaptación de los existentes es ilimitada.

La mayoría de las publicaciones estudiadas por Hajkowicz y Collins (2006) utilizaron más de una técnica de AMC, para comprobar la sensibilidad de los resultados. Varios autores han efectuado estudios comparativos sobre las diferentes técnicas de AMC aplicadas a la gestión del recurso hídrico (Gershon y Duckstein, 1983; Ozelkan y Duckstein, 1996; Eder *et al.* 1997), encontrando que no hay una ventaja metodológica clara en el análisis de un problema para ninguna de las técnicas de AMC. Howard (1991) obtuvo resultados similares en gestión forestal y concluyó que el aspecto más importante del AMC es la selección de los criterios y de las alternativas, es decir tener en cuenta las características del estudio-problema y también las características o propiedades de cada AMC, para finalmente determinar la mejor técnica.

Algunas de las aplicaciones del AMC para la gestión del recurso hídrico se describen a continuación. Hamouda *et al.* (2009) efectuaron un estudio sobre las técnicas de toma de decisiones utilizadas para determinar la selección, la secuencia de unidades de tratamiento y el diseño de sistemas de tratamiento para agua potable, aguas residuales domésticas e industriales. Este estudio abarcó un compendio de enfoques y métodos para ayudar a los desarrolladores de sistemas de soporte de decisión seleccionar el enfoque más adecuado, el cual se consolidó en un marco teórico de cuatro fases. La primera fase – Análisis del problema del tratamiento de aguas– incluye el análisis y la interpretación del problema en cuestión; la fase 2 –Alternativas para representación del conocimiento y el razonamiento– incluye el desarrollo de los modelos de razonamiento en que el conocimiento adquirido de la primera fase se puede representar numéricamente o en la forma heurística; la tercera fase –Secuencia de decisión óptima– representa el soporte actual de decisión, donde las alternativas se generan y se evalúan y el proceso de selección y diseño se efectúa, en esta etapa los métodos óptimos cumplen un papel fundamental incorporando todos los factores para escoger la mejor alternativa; la fase final – Aspectos de factibilidad de uso– asegura la factibilidad de uso del sistema de soporte de decisión validando y verificando su lógica.

Makropoulos *et al.* (2008) desarrollaron una herramienta para el soporte de la toma de decisiones denominada Urban Water Optioneering Tool (UWOT), la cual facilita la selección de combinaciones de estrategias y tecnologías para el ahorro del agua, y para apoyar la ejecución de la gestión integrada y sostenible del agua en los nuevos desarrollos urbanos. Aplicaron esta herramienta en un desarrollo urbano del Reino Unido.

En 2007, debido a la popularidad que han tenido las soluciones alternativas de control en la fuente de las aguas lluvias en las áreas urbanas –mejores prácticas de gestión (BMP- de sus siglas en inglés Best Management Practices)–, Martin *et al.* (2007) desarrollaron una propuesta para el uso del AMC para la ayuda a la decisión multi-criterio de las mejores prácticas de gestión (BMP), específicamente para ocho sistemas de retención. Este estudio planteó un ejercicio teórico para guiar al usuario para que

él mismo identificara las posibles soluciones de cada caso en particular. Para conocer el comportamiento de estos sistemas bajo determinados aspectos (técnicos, hidráulicos, medio ambientales, sociológicos, económicos y de mantenimiento), se realizó una encuesta a nivel nacional (Francia). El análisis de los resultados de las encuestas permitió que la retroalimentación de los usuarios de los BMP se tuviera en cuenta para evaluar el desempeño de cada uno de los sistemas. Estos resultados se utilizaron como soporte para el análisis multi-criterio. El AMC utilizado en este estudio fue ELECTRE III. Para el ejemplo se definió la matriz de posibles soluciones a partir de la encuesta realizada, de la literatura y de estudios anteriores, se asignaron los pesos para cada criterio desde tres puntos de vista de partes interesadas (asumiendo que hacía parte del proceso de la toma de la decisión), se determinaron los umbrales del modelo (preferencia, indiferencia y veto), obteniendo así tres diferentes estrategias. Se compararon los resultados del AMC con los de las encuestas, se obtuvieron diferencias las cuales destacan la importancia de la evaluación de desempeño de los BMP en el proceso de toma de decisión.

Así mismo, Baptista *et al.* (2004) elaboraron una propuesta de evaluación de los sistemas de drenaje urbanos. La cual consistió en la definición una metodología sencilla para la ayuda en la toma de decisiones y en un software asociado (AvDren) relativo a los sistemas urbanos de aguas lluvias. Esta propuesta evalúa y compara diferentes escenarios usando BMP de acuerdo a diferentes aspectos. La metodología se basa en determinar un índice global de desempeño –determinado en base a criterios hidrológicos, sanitarios, medio ambientales y sociales– y un indicador de costo que tiene en cuenta costos constructivos, de mantenimiento y de operación. Este trabajo se desarrolló para condiciones brasileras, el cual puede ser utilizado por otros países en desarrollo con condiciones tropicales.

Por otro lado, Abrishamchi *et al.* (2005) aplicaron la técnica de AMC programación de compromiso para la gestión del abastecimiento del agua urbana caso de estudio la ciudad de Zahidan en Irán. Se utilizó esta técnica para seleccionar la mejores alternativas posibles para la distribución del agua potable para la ciudad, dado que la ciudad enfrentaba serios problemas tanto en calidad como en la cantidad de agua. De este estudio concluyeron que para los países en desarrollo la aplicación del AMC es limitada por varios factores, pero principalmente por limitaciones institucionales.

A nivel nacional, debido a la importancia de seleccionar adecuadamente el sistema de potabilización de agua Galvis y Vargas (2005) desarrollaron el modelo para la Selección de Tecnología y análisis de Costos en sistemas de potabilización de agua –SelTec–. Este modelo permite seleccionar alternativas de potabilización considerando aspectos técnicos, socioculturales, institucionales, económicos y financieros. Este modelo fue desarrollado por el Instituto Cinara de la Universidad del Valle en un proyecto para el Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia. SelTec incluye un modelo conceptual y un programa de computador, permite estimar costos de inversión inicial operación y mantenimiento de diferentes tecnologías de tratamiento (Coagulación, sedimentación, filtración rápida, entre otras). Se encuentra delimitado para poblaciones menores a 30.000 habitantes.

Adicionalmente, Galvis *et al.* (2005) desarrollaron un modelo conceptual para la Selección de Tecnología para el Control de la contaminación por Aguas Residuales Domésticas –SELTAR–. El modelo tiene como punto de partida la priorización de las inversiones y los objetivos ambientales, considerando también otros aspectos como los técnicos, socioculturales e institucionales. SELTAR se

constituye en un sistema experto –base de conocimientos, base de hechos– que facilita la toma de decisiones. Este modelo se construyó en base a un marco conceptual que involucra diferentes conceptos –producción más limpia, gestión integrada de recursos hídricos, entre otros–, el cual relaciona la experiencia de varios autores y la caracterización de la oferta tecnológica. Adicionalmente, se aprovechó la experiencia de algunas instituciones del sector de agua y saneamiento. El modelo contempla 104 esquemas de tratamiento de aguas residuales y 9 alternativas tecnológicas para la disposición de lodos, SELTAR se ha sometido a una validación preliminar aplicándolo a casos de localidades colombianas.

En la literatura se encuentran descripciones suficientes de cada método de análisis multi-criterio, por ejemplo en Smith *et al.* (2000), Figueira *et al.* (2005),

## 2.2 MÉTODOS ELECTRE

Los métodos ELECTRE nacieron en julio de 1965, con el método ELECTRE I (escoge la mejor acción de un conjunto de acciones) en una conferencia en Roma (Italia) (*les journées d'études sur les méthodes de calcul dans les sciences de l'homme*) presentado por B. Roy – como una nueva opción que superaba los inconvenientes que generaba el método MARSAN (*Méthode d'Analyse, de Recherche, et de Sélection d' Activités Nouvelles*), creado por la empresa europea SEMA (Figueira y Roy, 2005). A partir de ELECTRE I fueron surgiendo diferentes versiones, las más destacadas son ELECTRE II, III y IV (estas versiones hacen parte de los métodos que generan un ranquin de alternativas). La versión más reciente es ELECTRE TRI (Smith *et al.*, 2000; Figueira y Roy, 2005).

### 2.2.1 ELECTRE I

Este es el método más sencillo de la familia de los métodos ELECTRE, el cual sólo debe aplicarse cuando las evaluaciones de las alternativas respecto a cada uno de los criterios tengan la misma escala (en la matriz de posibles soluciones) (Figueira *et al.*, 2005).

ELECTRE I selecciona la mejor opción de un conjunto de alternativas, realizando comparaciones entre parejas de posibles soluciones. Dichas comparaciones se basan en la matriz de posibles soluciones en la que cada alternativa se evalúa con respecto a cada criterio. Los criterios se ponderan de acuerdo a su importancia dentro del conjunto. Para comparar el desempeño de cada alternativa se deben calcular los índices de concordancia y discordancia (Smith *et al.*, 2000; Figueira *et al.*, 2005).

El índice de concordancia define que tanto una alternativa supera a otra y el índice de discordancia define el grado de desacuerdo que existe al decir que una alternativa supera a otra (Smith *et al.*, 2000).

### 2.2.2 ELECTRE II

A finales de la década de 1960 surgió el método ELECTRE II, el cual fue desarrollado por Roy (1968, 1971) y Roy y Bertier (1971). Este método fue el primer método –de la familia de ELECTRE– especialmente diseñado para tratar los problemas de determinación del orden de las opciones

(ranquin), de la mejor alternativa a la peor. También fue el primer método que se basó en la construcción de secuencias de relaciones de superación binarias (Figueira *et al.*, 2005).

La herramienta propuesta en este trabajo se basa en ELECTRE II por lo tanto se describirá con más detalle este método en el numeral 2.2.6. ELECTRE II – GENERALIDADES.

### 2.2.3 ELECTRE III

Después de desarrollo de ELECTRE II años más tarde nació ELECTRE III. Este método fue diseñado para mejorar ELECTRE II y para manejar la imprecisión y la incertidumbre de los datos de la matriz de posibles soluciones (Figueira *et al.*, 2005).

ELECTRE III determina el índice de concordancia entre las alternativas por cada criterio utilizando nuevos conceptos: el umbral difuso de indiferencia y el umbral difuso de preferencia, para redefinir las relaciones de preferencia. Este método implementa el umbral difuso de veto para determinar el índice de discordancia el cual permite rechazar la premisa que una alternativa supera a la otra. De acuerdo a la literatura los umbrales descritos anteriormente son difíciles de valorar, pero se pueden obtener arbitrariamente de acuerdo al conocimiento experto o por medio de encuestas (Smith *et al.*, 2000).

Para determinar la preferencia entre alternativas se combinan las matrices de concordancia y discordancia para crear el índice de credibilidad, el cual valora la intensidad de la premisa que una alternativa es al menos tan buena como otra. Este proceso permite establecer la clasificación de las alternativas (Smith *et al.*, 2000).

### 2.2.4 ELECTRE IV

Esta versión surgió de la aplicación relacionada con la red subterránea de París. Con ELECTRE IV es posible obtener el ranquin de las alternativas sin necesidad de utilizar los coeficientes de los criterios de importancia relativa (los pesos de los criterios) (Figueira *et al.*, 2005).

El decisor define métricas para evaluar los criterios, los rangos recomendados para estas métricas son entre 0 y 10 y deben incluir para cada nivel la clasificación fuerte y la débil. La matriz de posibles soluciones se transforma a las unidades de las métricas propuestas. Luego se realiza la comparación por pares y se establecen las comparaciones de preferencia estricta, débil o indiferencia respecto a cada criterio (Smith *et al.*, 2000).

### 2.2.5 ELECTRE TRI

Es el método de la familia ELECTRE más reciente y más general. ELECTRE TRI se diseñó para agrupar las alternativas en categorías. Estas categorías se encuentran ordenadas. La asignación de las alternativas a las categorías se realiza comparando sus características con los límites (superior e inferior) definidos para cada grupo. En este método se determina el índice de credibilidad como en ELECTRE III y las preferencias van a ir aumentando con el valor en cada criterio (Figueira *et al.*, 2005).

ELECTRE TRI utiliza dos procesos para la clasificación una asignación de optimismo (el criterio con mejor ranquin determina la asignación) y una asignación de pesimismo (el criterio con peor ranquin determina la asignación) (Srinivasa *et al.*, 2001).

## 2.2.6 ELECTRE II – GENERALIDADES

Este método consiste en realizar comparaciones entre parejas de alternativas –posibles soluciones–, para lo cual es necesario establecer criterios de evaluación  $j$  para éstas sobre un conjunto de criterios  $J$ . Dichas comparaciones se basan en la matriz de posibles soluciones en la que cada alternativa  $a$  se evalúa con respecto a cada criterio  $j$ : esta evaluación se denomina  $g_j(a)$ . Luego se pondera la importancia relativa de cada criterio ( $w_j$ ) en el conjunto. Es posible que para dos alternativas  $a$  y  $b$  evaluadas según un criterio  $k$ , si se tiene la relación  $g_k(a) > g_k(b)$ , la alternativa  $a$  es más deseable que la  $b$ ; pero para las mismas alternativas  $a$  y  $b$  evaluadas según otro criterio  $m$ , si se tiene la relación  $g_m(a) > g_m(b)$ , la alternativa  $b$  es más deseable que la  $a$ . Debido a lo anterior, se debe tener claridad sobre el sentido de preferencia de los criterios en la matriz de posibles soluciones (Roy, 1967).

Para comparar el desempeño de cada alternativa  $a$  y  $b$  se deben calcular los índices de concordancia y discordancia (Smith *et al.*, 2000). El índice de concordancia entre  $a$  y  $b$  se define por medio de la ecuación 1 (Figueira *et al.*, 2005).

$$c(a,b) = \sum_{\{j: g_j(a) \geq g_j(b)\}} w_j \quad (1)$$

Donde  $c(a,b)$  es la suma de los pesos de aquellos criterios para los cuales la alternativa  $a$  es más deseable que la alternativa  $b$ .

El índice de discordancia se determina por medio de la ecuación 2 (Figueira *et al.*, 2005).

$$d(a,b) = \max_{\{j: g_j(a) < g_j(b)\}} \left\{ \frac{g_j(b) - g_j(a)}{\delta_j} \right\} \quad (2)$$

Donde  $d(a,b)$  es la diferencia máxima entre las puntuaciones asignadas a las alternativas ( $g_j(b)$  y  $g_j(a)$ ) respecto a los criterios para los que la alternativa  $a$  no es más deseable que la alternativa  $b$ , dividida por el rango observado  $\delta_j$  de cada criterio  $j$  ( $\delta_j = \max(g_j(a), g_j(b), \dots, g_j(n)) - \min(g_j(a), g_j(b), \dots, g_j(n))$ , donde el juego de alternativas contempladas es  $\{a, b, \dots, n\}$ ) (Smith *et al.*, 2000).

Ambos índices deben calcularse para cada una de las parejas de soluciones ( $a,b$ ), donde  $a \neq b$ . Con estos valores se construyen las matrices de concordancia  $C$  y de discordancia  $D$ , donde el elemento  $c(a,b)$  o  $d(a,b)$  representa el índice de concordancia o discordancia respectivamente entre las alternativas  $a$  y  $b$ , ubicado en la posición  $(a,b)$  de la matriz (ver figura 1) (Figueira *et al.*, 2005).

	a	b	c	...	n
a	X	C(a,b)	C(a,c)		C(a,n)
b	C(b,a)	X	C(b,c)	...	C(b,n)
c	C(c,a)	C(c,b)	X		C(c,n)
⋮	⋮	⋮	⋮	...	...
n	C(n,a)	C(n,b)	C(n,c)		X

Figura 1. Matriz de concordancia (Fuente: elaboración propia)

Para definir las relaciones binarias, se estipulan tres niveles o umbrales de concordancia ( $c_{min,i}, i=1,2,3$  tal que  $c_{min,1} \geq c_{min,2} \geq c_{min,3} \geq 0$ ) y dos niveles aceptables o umbrales de discordancia ( $d_{max,i}, i=1,2$  tal que  $0 \leq d_{max,1} \leq d_{max,2} \leq 1$ ) por criterio (Roy y Bertier, 1971).

Por lo tanto, una alternativa **a** es estrictamente preferida a la alternativa **b** si y sólo si una (o ambas) de las siguientes condiciones se cumplen (Roy y Bertier, 1971):

Condición 1 (ecuaciones 3 y 4):

$$c(a,b) \geq c_{min,1} \quad (3)$$

$$d(a,b) \leq d_{max,2} \quad (4)$$

Condición 2 (ecuaciones 5 y 6):

$$c(a,b) \geq c_{min,2} \quad (5)$$

$$d(a,b) \leq d_{max,1} \quad (6)$$

Para el caso de la superación débil, una alternativa **a** supera débilmente a **b** si y sólo si se cumple lo siguiente (ecuaciones 7 y 8):

$$c(a,b) \geq c_{min,3} \quad (7)$$

$$d(a,b) \leq d_{max,2} \quad (8)$$

Una alternativa puede superar fuertemente o débilmente a otra. La superación fuerte indica una clara preferencia de una alternativa frente a la otra, mientras que la superación débil indica que no se puede asegurar de manera definitiva que una alternativa sea preferible a otra. La utilización de estos dos conceptos posibilita la clasificación de alternativas (Roy y Bertier, 1971).

Con las relaciones de superación entre las alternativas definidas se procede a representar el grafo débil y el grafo fuerte (figura 2). Cada nodo del grafo representa cada alternativa. En el caso del grafo fuerte se muestra cuál alternativa supera fuertemente a otra (figura 2a) y en el caso del grafo débil se muestra cuál alternativa supera débilmente a otra (figura 2b).

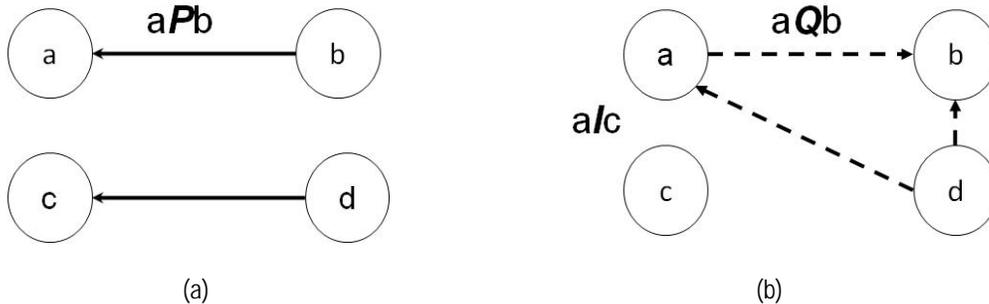


Figura 2. (a) Grafo fuerte y (b) grafo débil (Fuente: elaboración propia)

Con los grafos (grafo débil y grafo fuerte) definidos, continúa el procedimiento de clasificación, el cual se desarrolla en tres niveles. Inicialmente se obtiene una clasificación directa, luego una indirecta y finalmente se promedian las dos clasificaciones anteriores generando la clasificación final (Smith *et al.*, 2000).

A partir del grafo de relaciones se realiza la clasificación directa por medio del procedimiento descrito en la tabla 2 y algoritmo presentado en la figura 3 (Smith *et al.*, 2000).

Tabla 2. Clasificación directa (Adaptado: página 174-175 de Smith *et al.*, 2000)

Paso 1:	El primer conjunto a generar es D, el cual se conforma con los nodos de conjunto inicial $Y_k$ que no tienen precedentes en el Grafo Fuerte
Paso 2:	Después de tener el conjunto D se determina el conjunto F, el cual se conforma con los nodos del conjunto D que tienen relación en el Grafo Débil.
Paso 3:	Luego se determina el conjunto B, el cual se conforma con los nodos del conjunto F que no tienen precedentes en el Grafo Débil.
Paso 4:	Se determina el conjunto $A_k$ por medio de la siguiente operación $A_k=(D-F) \cup B$ , este conjunto va estar conformado por las mejores alternativas en orden de llegada.
Paso 5:	Cada vez que obtiene un nodo en $A_k$ se elimina este del conjunto $Y_k$ y se vuelve a definir los conjuntos D,B, F y $A_k$ (volver al Paso 1) hasta que el conjunto $Y_k$ sea igual al conjunto vacío.

Donde  $k$  es el número de iteraciones,  $Y^{(k)}$  es un subconjunto del Grafo Fuerte (Gf) donde  $Y^{(0)} = Gf$ , y  $D, F, B$  y  $A^{(k)}$  son conjuntos que se definen de la siguiente manera (Smith *et al.*, 2000):

$$D = \{\text{Puntos sin antecedentes en el Grafo fuerte (Gf)}\}$$

$$F = \{\text{Puntos en D que están ligados en el Grafo débil (Gd)}\}$$

$$B = \{\text{Puntos sin antecedentes en F, que no tienen precedentes en Gd}\}$$

$$A^{(k)} = (D - F) \cup B \text{ (Son los puntos retenidos)}$$

$v'(A)$  es la clasificación que se va asignando a cada  $A$  que pertenece a  $A^{(k)}$ . El algoritmo finaliza cuando  $Y^{(k+1)}$  es un conjunto vacío, por lo tanto todas las alternativas han sido clasificadas (Smith *et al.*, 2000).



Por otro lado, la clasificación indirecta consta de tres pasos descritos en la Tabla 3 (Smith *et al.*, 2000).

**Tabla 3.** Clasificación indirecta (Adaptado: página 175 de Smith *et al.*, 2000)

Paso 1:	Se cambian la dirección de los grafos (si antes estaba $aPb$ : la alternativa $a$ superaba fuertemente a $b$ ahora debe quedar $bPa$ : la alternativa $b$ superaba fuertemente a $a$ )
Paso 2:	Luego se generan los cuatro conjuntos (D, F, B y A) hasta evaluar todas las alternativas (como en la clasificación directa) usando el algoritmo mencionado anteriormente
Paso 3:	Finalmente el conjunto $A_k$ va estar conformado por las alternativas en orden de llegada, pero a diferencia de la clasificación fuerte la que quedó de primera es realmente la última, la segunda en la penúltima y así sucesivamente

Finalmente, con las calificaciones directa e indirecta obtenidas, se define el valor promedio de la clasificación de cada alternativa y se ordenan ascendentemente.

Para  $k=0$

$$Y^{(k)} = Y^{(0)} = Gf$$

$D = \{\text{Nodos de } Y^{(k)} \text{ que no tengan precedentes en } Gf\}$

$F = \{\text{nodos en } D \text{ que tienen relación en } Gf\}$

$B = \{\text{nodos en } F \text{ que no tienen precedente en } Gf\}$

$$A^{(k)} = (D - F) \cup B$$

Asignar una calificación para cada  $A \in A^{(k)}$

$$v'(A) = k + 1$$

$$Y^{(k+1)} = Y^{(k)} \cdot A^{(k)}$$

$$Y^{(k+1)} = \{ \}$$

no

$$K = k + 1$$

$$Y^{(k+1)}$$

si

Fin

**Figura 3.** Algoritmo de clasificación (Adaptado de: Smith *et al.*, 2000)

## 2.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA LA GENERACIÓN DE VALORES ALEATORIOS Y CONSTRUCCIÓN DE CRITERIOS DE EVALUACIÓN

La construcción de la matriz de posibles soluciones es un proceso que implica incertidumbre, para manejarla se empleó la estadística y la probabilidad. Específicamente, estos conceptos teóricos se utilizaron en la generación de valores aleatorios entre datos extremos y en la construcción de los indicadores de los criterios de evaluación.

### 2.3.1 Conceptos Estadísticos

#### Distribución Probabilidad Uniforme

La función de densidad uniforme de una variable aleatoria  $X$  está dada por la ecuación 9, donde los parámetros  $a$  y  $b$  son valores reales ( $a < b$ ). La función de densidad de la distribución uniforme toma un valor constante de  $1/(a-b)$  para satisfacer el axioma de probabilidad, el cual dice que la suma del área por debajo de la curva de distribución debe ser igual a 1 (Ayyub y Mccuen, 2003).

$$f_x(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{para } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (9)$$

La varianza y el promedio se pueden determinar por medio de las ecuaciones 10 y 11. Debido a la geometría simple de la función de densidad éstas corresponden respectivamente a la distancia al *centroide* y al momento de inercia, respecto al eje vertical del área debajo de la curva de densidad (Ayyub y Mccuen, 2003).

$$\mu_x = \frac{1}{b-a} \quad (10)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{(b-a)^2}{12} \quad (11)$$

#### Distribución Probabilidad Normal

La distribución normal (conocida también con el nombre de distribución Gaussiana) es ampliamente usada debido a su simplicidad y aplicación. Esta distribución es la base para diferentes métodos estadísticos. Gran variedad de poblaciones numéricas se pueden ajustar con alta precisión a esta distribución (características físicas, errores de medición en experimentos científicos, mediciones de inteligencia y aptitud, numerosas medidas económicas e indicadores, entre otros). La función de densidad normal de una variable aleatoria  $X$  está dada por la ecuación 12 (Ayyub y Mccuen, 2003; Devore, 2006).



$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^2\right) \quad -\infty < x < \infty \quad (12)$$

La distribución normal tiene las siguientes propiedades:

- $f_x(x)$  se aproxima a cero cuando  $x$  se aproxima tanto a  $-\infty$  o  $\infty$
- $f_x(a+\mu) = f_x(-a+\mu)$  para cualquier valor  $a$
- El valor máximo de  $f_x(x)$  sucede cuando  $x$  es igual a  $\mu$
- Los puntos de inflexión de la función de densidad ocurren cuando  $x = \mu \pm \sigma$
- La función de densidad tiene la forma de una campana
- Los parámetros de esta distribución son el valor promedio  $\mu$  y la varianza  $\sigma^2$

### Robustez y Sensibilidad

Los conceptos Robustez y Sensibilidad, se utilizan para evaluar los métodos de soporte a la toma de decisión. La robustez se refiere a la aptitud para dar una tendencia similar a pesar de la incertidumbre de la variabilidad de la evaluación. La sensibilidad es la variación significativa del resultado de un proceso debido a un leve cambio realizado en alguna de sus entradas (González y Cotos., 2005; Moura, 2008).

### Método de Monte Carlo

Este método se utilizó para la generación de valores aleatorios de la matriz de posibles soluciones, de los pesos de los criterios y del umbral de concordancia.

El método de Monte Carlo es un método numérico (no analítico) que permite resolver problemas matemáticos, mediante el muestreo aleatorio de variables aleatorias. Al problema matemático se le puede asociar un modelo probabilístico artificial, aunque este no tenga relación con procesos aleatorios. En este sentido se puede determinar que este método es un método universal de cálculo (Rodríguez *et al.*, 1999; A.H.E.P.E., 2006).

El principio detrás de este método es el desarrollo de un modelo analítico empleando herramientas computacionales que predicen el comportamiento de un sistema. Determinadas herramientas analíticas son usadas para asegurar la selección aleatoria de los parámetros del sistema de acuerdo a su respectiva función de probabilidad (Ayyub y Mccuen, 2003). Por medio de éste método no se encuentran soluciones exactas sino una solución aproximada mediante iteraciones. La precisión de la solución depende del número de iteraciones o aproximaciones efectuadas (A.H.E.P.E., 2006).

### Incertidumbre

Cuando se analiza un sistema implica el desarrollo de un modelo, el cual puede verse como la abstracción de algunos aspectos del sistema. Al realizar dicha abstracción el analista o el ingeniero decide qué aspectos incluye o excluye. Adicional a lo anterior, dependiendo del estado de conocimiento

del sistema y de la experiencia y del conocimiento del analista o el ingeniero, otros aspectos del sistema no se pueden determinar. En los aspectos del sistema (abstractos, no abstractos, desconocidos y los que no se puede conocer), varios tipos de incertidumbre se pueden presentar (aleatoriedad física; incertidumbre del modelo; parámetros, medidas y relaciones vagamente definidas; errores humanos; conflicto y confusión en la información; extensión de la desviación entre el modelo y el sistemas real, falta de conocimiento). Algunos tipos de incertidumbre pueden manejarse utilizando probabilidad, estadística, confiabilidad y métodos Bayesianos (Ayyub y Mccuen, 2003).

La incertidumbre es la falta de información, específicamente es la diferencia entre la cantidad de información requerida para llevar a cabo una tarea y la cantidad de información que actualmente se posee (Galbraith, 1973; Grote, 2009). Esta puede clasificarse de acuerdo a su fuente en: (i) ambigüedad, (ii) aproximaciones y (iii) verosimilitud. La ambigüedad proviene de la posibilidad de tener diferentes resultados de procesos o sistemas, el reconocimiento de algunos de estos resultados genera incertidumbre. El proceso de aproximación (reducción y generalización cuando se está desarrollado conocimiento) involucra imprecisión, generalidad y simplificación. La verosimilitud tiene los componentes primarios de aleatoriedad y muestreo, puede definirse en términos de posibilidad, de causa y de azar (Ayyub y Mccuen, 2003).

Para el cálculo de la incertidumbre existen enfoques analíticos o numéricos. Los primeros, como la ley de propagación de incertidumbres, son utilizados cuando se trata de problemas o fenómenos relativamente sencillos (Topliceanu, 2007). Los métodos numéricos para la estimación de las incertidumbres, como el método de Monte Carlo, se utilizan cuando no es posible o se hace muy engorroso utilizar métodos analíticos (Hammonds et al., 1994; Warwick, 1997; Poulter, 1998; Greenland, 2001; Smith, 2002).

### Probabilidad de falla

La probabilidad de un evento puede definirse como la frecuencia relativa de su ocurrencia: si un experimento puede repetirse  $N$  veces con  $n$  ocurrencias del evento subyacente la probabilidad de ocurrencia del evento se determina por medio de la ecuación 13. La probabilidad es una medida de escala usada para describir la verosimilitud de un evento (Ayyub y Mccuen, 2003).

$$P(X = x_0) = \frac{n}{N} \quad (13)$$

### 2.3.2 Conceptos Hidrológicos

Para determinar el caudal superficial producido por una cuenca se empleó el Método Racional, el cual sirve para cuencas menores a 1.300 ha. El caudal ( $Q$ ) (L/s) se estima por medio de la ecuación 14, donde  $C$  es el coeficiente de escorrentía,  $I$  es la intensidad promedio de la lluvias (L/s/ha) y  $A$  es el área de la cuenca de drenaje en (ha) (López, 2009).

$$Q = C \times I \times A \quad (14)$$

### 2.3.3 Conceptos Financieros - Índices de bondad de un proyecto

#### a) Valor Presente Neto - VPN

El Valor Presente Neto es un método muy utilizado por su fácil aplicación y porque todos los ingresos y egresos futuros se transforman a pesos de hoy, con lo cual se puede ver si los ingresos son mayores que los egresos. En otras palabras es la ganancia extraordinaria que genera el proyecto, medida en unidades monetarias actuales. El VPN se determina por medio de la ecuación 15 (Baca, 1992; Arboleda, 2003).

$$VPN = -S_0 + \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{(1+r)^i} \quad (15)$$

Donde  $S_0$  es la inversión inicial,  $F_i$  los flujos netos de cada año  $i$  y  $r$  es la tasa de interés. Si el  $VPN < 0$  hay una pérdida a una cierta tasa  $i$ , en el caso de que el  $VPN > 0$  implica que hay ganancia y cuando  $VPN = 0$  significa que el proyecto es indiferente (los proyectos invertidos en el proyecto rinden exactamente  $i$ ).

#### Tasa Interna de Retorno - TIR

La Tasa interna de Retorno es la denominada tasa interna de rendimiento, la cual mide la rentabilidad de un proyecto. Es también la tasa de interés que hace que el VPN sea igual a cero. La TIR se determina por medio de la ecuación 16 (Arboleda, 2003).

$$VPN = -S_0 + \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{(1+TIR)^i} = 0 \quad (16)$$

## 2.4 SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE

El concepto de drenaje sostenible, desarrollado en Norte América y Europa, incluye a largo plazo factores ambientales y sociales en los proyectos de drenaje que busca mantener la integridad ecológica, ambiental e hidrológica de un lugar, respecto a su condición previa al desarrollo urbano (Delleur, 2003).

El objetivo primordial de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) es minimizar los impactos propios de la infraestructura y la actividad antrópica en la calidad del agua, por medio de la creación de prácticas que disminuyan la generación de escorrentía urbana favoreciendo de esta forma la infiltración y el almacenamiento y manteniendo y potenciando la red de drenaje natural. La práctica muestra que

estos sistemas generan una serie de beneficios económicos, sociales y ambientales, debido a que estos son más sostenibles que los métodos convencionales, puesto que (Durrans, 2003):

- Controlan los altos flujos de la escorrentía, reduciendo el impacto de la urbanización.
- Incrementan el tiempo de concentración.
- Conservan o mejoran la calidad del agua.
- Simpatizan con el medio ambiente y las necesidades de la comunidad local.
- Proveen un hábitat a los animales en los cursos de agua.
- Fomentan la recarga de los acuíferos.

Los SUDS se clasifican en dos grandes grupos: los de tipo estructural y los de tipo no estructural. Los de tipo no estructural son una variedad de prácticas institucionales y educativas llamadas comúnmente «control de fuente o prevención de la contaminación», los cuales buscan reducir o eliminar el ingreso de contaminantes a las aguas lluvias (Urbanas, 1999). Estas prácticas no eliminan completamente los contaminantes, pero pueden hacer que los controles estructurales sean más efectivos, al reducir las cargas contaminantes que estos últimos pueden manejar. Por otro lado, los SUDS de tipo estructural son sistemas que aumentan la infiltración, minimizan el volumen de escorrentía superficial, realizan detenciones temporales, o tratamientos temporales de la escorrentía urbana antes de que ésta llegue a los cuerpos receptores de agua. Algunos ejemplos de estos sistemas son estanques de detención, pavimentos permeables, canales vegetados, humedales, entre otros (Durrans, 2003).

En comparación con los sistemas convencionales de drenaje, los cuales están concebidos para recolectar, canalizar y descargar lo más eficiente y rápidamente posible la escorrentía superficial, pero que no consideran la generación considerable de escorrentía urbana y el impacto generado a los cuerpos superficiales de agua, los SUDS buscan mantener las condiciones hidrológicas del lugar antes de la urbanización minimizando ese impacto. La incorporación de los SUDS en el diseño urbano producen un desarrollo de bajo impacto para el lugar, conservando y mejorando los lugares de alto valor ambiental, para adaptarlos a la nueva condición urbana; lo que implica la utilización de materiales permeables para las zonas duras y de la disminución de las zonas impermeables aprovechando para ello las zonas verdes (jardines, parques públicos, glorietas y separadores), las cuales se diseñan desde la óptica de la hidrología (Fernández, 2005).

#### 2.4.1 Pavimentos Permeables

Los pavimentos permeables son un dispositivo de infiltración especial, cuya función principal es la de reducir la escorrentía superficial, gracias al incremento de la permeabilidad de la carpeta de rodadura y la subbase, lo cual requiere de una granulometría especial. Este sistema puede comportarse como un sistema de infiltración (sistema tipo A), o almacenamiento temporal (sistema tipo B), o almacenamiento permanente (sistema tipo C). Lo anterior depende de las características de los suelos del lugar, o si se desea utilizar el agua lluvia recolectada. Este sistema se puede emplear en zonas como andenes, estacionamientos, canchas de uso múltiple, ciclovías, senderos en áreas verdes y vías (MINVU, 1999; Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2000; Interpave, 2008).

En la Figura 4 muestra la sección transversal típica del pavimento permeable de almacenamiento permanente (tipo C)

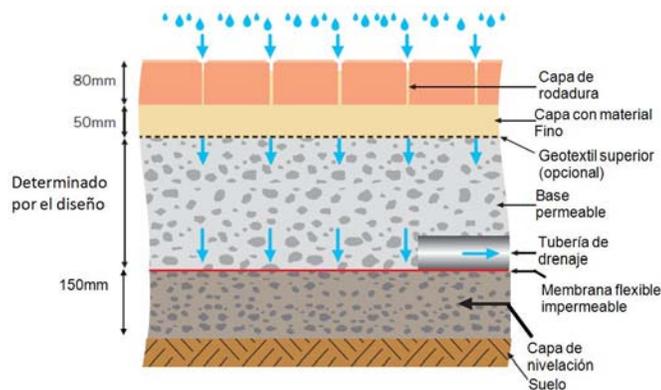


Figura 4. Sección transversal de un Pavimento Permeable (Adaptado de: Interpave, 2008)

El método de pre-dimensionamiento consta de dos partes i) Pre-diseño Hidráulico y (ii) Pre-diseño Estructural. El espesor de la Base Permeable se determina en ambos diseños, luego se comparan y el mayor es el espesor definitivo (Interpave, 2008).

En el pre-diseño Hidráulico se determina el espesor de la Base Permeable (en donde se va almacenar el agua), para un periodo de retorno mínimo de 5 años. Este espesor se obtiene con la máxima diferencia entre el volumen acumulado de aguas lluvias que recibe la base y el volumen acumulado que sale de la estructura por medio de las tuberías de drenaje. Este volumen máximo es afectado por la porosidad del material pétreo y se divide entre el área superficial disponible, obteniendo el espesor de la base (MINVU, 1999).

El pre-diseño Estructural consta de los siguientes pasos:

- (i) Selección de la categoría de carga (Tabla 4), de acuerdo al uso.
- (ii) Definición de la altura de la capa de rodadura, la cual depende de la categoría de carga, para los sistemas de Pavimento Permeable Tipo C se utiliza la Tabla 5.
- (iii) Ajuste de la altura para CBR (California Bearing Ratio –relación de capacidad de soporte de suelo) menores a 5%, para los sistemas tipo C esto puede incurrir en el aumento de la Subbase o de la capa de nivelación (Tabla 6, Interpave (2008))

Tabla 4. Categoría de carga (Adaptado de: Interpave, 2008)

1 Parqueadero Doméstico	2 Carro	3 Peatón	4 Compras	5 Comercial	6 Tráfico Pesado
Sin vehículos de mercancías grandes	Solo vehículos de emergencia grandes	Un vehículo grande por semana	Diez vehículos grandes por semana	Cien vehículos grandes por semana	Mil vehículos grandes por semana
<b>Cero Ejes estándar</b>	<b>Cien ejes estándar</b>	<b>0,015 msa</b>	<b>0,15 msa</b>	<b>1,5 msa</b>	<b>15 msa</b>
Patio	Bahías de parqueo	Andenes para peatones	Zonas de descarga de Vehículos de mercancías.	Industrias locales	Vías principales
Vía privada	Andenes de estaciones de transporte público	Accesos a emergencias en hospitales	Vía de acceso a colegios	Vía publica poco transitada	Centro de distribución
Función decorativa	Exteriores de las salas de exposición de carros	Zona de parqueo residencial	Ruta de entrega en oficinas	Zona industrial poco transitada	Estaciones de bus
Patio de Recreo	Rutas peatonales de los estadios deportivos	Zonas externas a parques centrales	Ruta de entrega en urbanizaciones	Vías en complejo industrial	Paradero de camiones
Senda peatonal sin vehículos	Ruta peatonal con uso deportivo ocasional	Crematorio de cementerios	Ruta de entrega en parque central	Plaza de la ciudad	Glorieta
	Cruce de acera en un conjunto privado	Parqueaderos de hoteles	Parqueadero estación de bomberos	Vía peatonal bastante transitada	Carril para buses
		Parqueaderos de Aeropuertos	Parqueadero de aeropuerto con buses al terminal	Carreteras cercanas a aeropuertos	
		Centros deportivos	Ruta de acceso en estadios deportivos		

msa = Millones de ejes estándar de 8000 kg

Tabla 5. Cuadros de diseño para los Sistemas Tipo C (Adaptado de: Interpave, 2008)

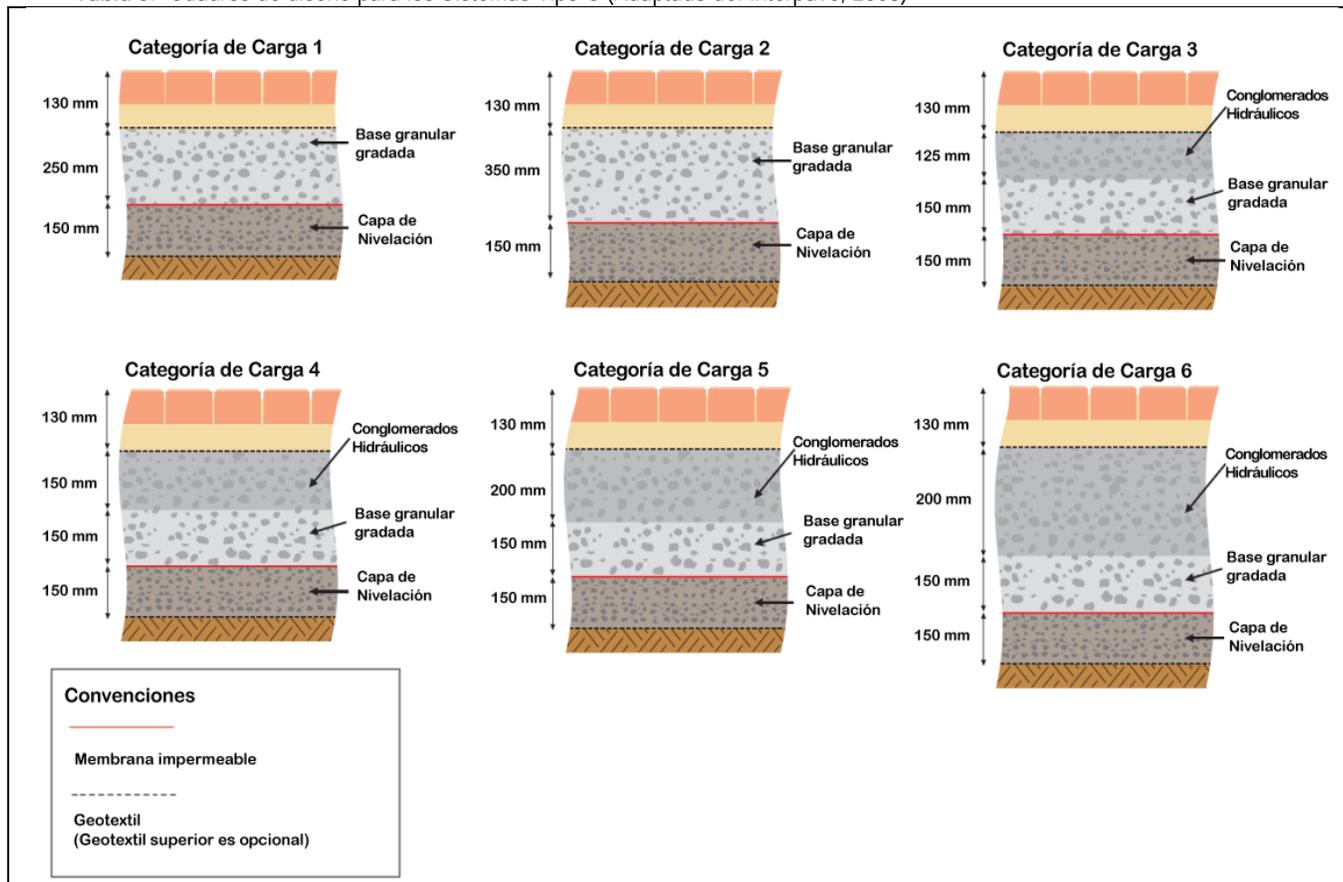




Tabla 6. Ajuste de la altura para CBR bajos (Adaptado de: Interpave, 2008)

CBR	Total de grosor de la capa nivelación del material en el caso del sistema C (detención) pavimentos (mm)
1%	600*
2%	350
3%	250
4%	200
5%	150
8%	
10%	
15%	

\*Debe buscarse orientación de expertos en el caso que los pavimentos construidos estén ubicados sobre suelos con CBR inferior al 2%.

#### 2.4.2 Jardines de Bioretención

Los Jardines de Bioretención son zonas paisajísticas adaptadas para atenuar y tratar la escorrentía urbana. Este sistema utiliza las propiedades físicas, biológicas y químicas de las plantas y de los suelos para remover los contaminantes. Esta práctica de bajo impacto involucra diferentes procesos como sedimentación, adsorción, filtración, evaporación, descomposición, intercambio iónico, bioremediación (proceso para degradar los contaminantes por medio de plantas) y capacidad de almacenamiento, para controlar las aguas lluvias (PGCo, 2009).

Este sistema se puede utilizar para minimizar las áreas impermeables en zonas comerciales, residenciales e industriales, ubicándolos en lugares como las islas de los parqueaderos, sardineles o en pequeños jardines residenciales (EPA, 2004).

Para el pre-dimensionamiento de este de este sistema se utilizó la metodología planteada por el Manual de Bioretención de Maryland (PGCo, 2009) y por el Manual SUDS (CIRIA, 2007).

Inicialmente, se debe calcular el volumen de calidad de agua ( $WQ_v$ ) por medio de la ecuación 16, donde  $R_v$  es el coeficiente de escorrentía volumétrico,  $P$  la lluvia de diseño,  $A$  es el área de la cuenca de drenaje (PGCo, 2009).

$$WQ_v = P \cdot R_v \cdot A \quad (16)$$

La lluvia de diseño ( $P$ ) se obtiene al determinar el tiempo de concentración, para un flujo laminar (Brown *et al.*, 2001), y un periodo de retorno de 5 años. El coeficiente de escorrentía volumétrico ( $R_v$ ) se estima utilizando la ecuación 17, donde  $I$  es el Porcentaje de zona impermeable.

$$R_v = 0.05 + 0.009 \cdot (I) \quad (17)$$

El área del filtro ( $A_f$ ) se determina por medio de la ecuación 18, la cual se basa en la ley de Darcy. Las variables son profundidad del filtro ( $d_f$ ) debe estar entre 0.76 m y 1.20 m, coeficiente de permeabilidad del medio filtrante ( $k$ ) (usar 0.15 m/día = 0.5 ft/día), altura promedio del agua por encima del filtro ( $h_f$ )

(valores típicos 0.07 m = 3 in) y tiempo de diseño del drenaje del filtro ( $t_f$ ) (recomendado máximo 2 días) (ARC y Georgia DNR, 2001).

$$A_f = \frac{WQ_v \cdot d_f}{k(h_f + d_f) \cdot t_f} \quad (18)$$

Por último, se comprueba el pre-dimensionamiento comparando el volumen que debe almacenar el sistemas (75%  $WQ_v$ ) con el volumen de tratamiento durante el tiempo del drenaje del filtro ( $t_f$ ) (ecuación 19),  $h_{pond}$  es la profundidad máxima por encima del filtro y  $\Phi$  es la porosidad del material.

$$V_{tratamiento} = h_{pond} \cdot A_f + (d_f A_f \phi) \quad (19)$$

### 2.4.3 Humedales artificiales

Los humedales artificiales son zonas que permanecen todo el tiempo inundadas y soportan vegetación resistente a las condiciones saturadas del suelo. Este sistema está diseñado para maximizar la remoción de contaminantes de la escorrentía urbana, cuando el agua fluye a través del humedal, es tratada mediante procesos de sedimentación, filtración, oxidación, reducción, adsorción y precipitación. Lo principal de este sistema es que requiere mantener un caudal base para permitir el crecimiento adecuado de la vegetación, reducir la escorrentía urbana y desarrollar los diferentes procesos para la eliminación de contaminantes (EPA, 2004b; Kadlec *et al.*, 2009).

Los sistemas de humedal a flujo libre (FWS) son los utilizados para el tratamiento de la escorrentía urbana, debido a su habilidad de manejar los flujos intermitentes y los cambios de nivel. Este tipo de humedal está compuesto por aguas abiertas, vegetación flotante y plantas emergentes, el substrato generalmente usado puede ser el suelo nativo del lugar, arcilla o materiales geotécnicos impermeables (que previenen la filtración). El esquema típico de un FWS se puede observar en la Figura 5 (Kadlec *et al.*, 2009).

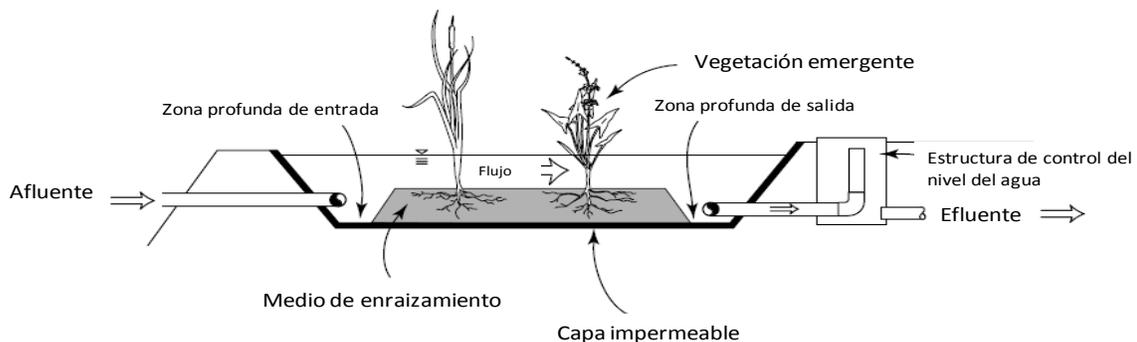


Figura 5. Esquema de humedal a flujo libre (FWS) (Adaptado de: Kadlec *et al.*, 2009)



El pre-dimensionamiento de los humedales artificiales se realizó por medio de la detención de la lluvia de diseño, éste se dimensiona para contener un volumen específico de agua. La lluvia de diseño puede ser la correspondiente a un determinado periodo de retorno o puede ser el percentil 90 de la lluvia (Kadlec *et al.*, 2009).

Inicialmente se determinó el volumen de escorrentía con el área de la cuenca a drenar, el coeficiente de escorrentía y la lluvia de diseño. Luego determinando una profundidad se determina el área superficial de humedal, la cual se verifica que esté entre el 5 y el 10% de la cuenca a drenar. Finalmente, se determinan unas relaciones la relación: área humedal / área cuenca a drenar (WWAR), para poder comparada con la de un humedal ya construido y la Tasa de Carga Hidráulica. Por último se determina el área del pondaje de entrada, el cual debe estar entre 10-45% del área total del humedal (Kadlec *et al.*, 2009).

### 3 MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL CAMPUS DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA SEDE BOGOTÁ

El campus actual de la Pontificia Universidad Javeriana sede Bogotá (PUJB) cuenta con 183.864 m<sup>2</sup>, de los cuales el 23.5% está ocupado por edificaciones, el 50% en zonas verdes, circulaciones y áreas deportivas, la distribución en porcentajes se muestran en la Figura 6 (MN&A, 2010). El campus universitario está integrado por 26 edificios académicos, biblioteca, instituciones hospitalarias, instituciones bancarias, 10 cafeterías, 3 auditorios, coliseo cubierto, campo de fútbol, 900 parqueaderos, 17.000 metros cuadrados de plazoletas peatonales y 74.000 metros cuadrados de jardines, arboledas y zonas verdes (Calderón y Espinel, 2003).

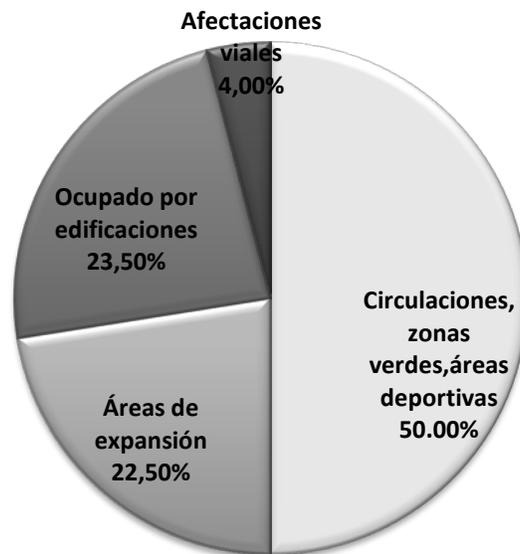


Figura 6. Distribución del área total de campus (Adaptado de: MN&A, 2010)

La distribución de edificios de acuerdo a su ubicación es la siguiente:

- (i) Parte alta del campus (sombreada en rojo en la Figura 7) Ed. 2 Fernando Barón, Ed. 94 Pedro Arrupe (Teología), Ed. 95 Manuel Briceño Jáuregui S.J. (Psicología), Ed. 91 Centro Javeriano de Formación Deportiva, Ed. 115 Guillermo Castro (Parqueadero), Ed. 67 José Rafael Arboleda S.J.
- (ii) Parte media (sombreada en verde en la Figura 7) Ed. 11. José Gabriel Maldonado S.J. (Ingeniería), Ed. 12 Laboratorio de Hidráulica, Ed. 09 Julio Carrizosa, Ed. 4 Dirección Administrativa, Ed. 41 Pablo VI (Facultad de Artes), Ed. 42 Salones Facultad de Artes, Ed. 45 San Francisco Javier (capilla y oficinas), Ed. 46 Cataluña, Ed. 44 Salones carrera de Música;



- (iii) Parte baja (sombreada en azul en la Figura 7) Ed. 05 Talleres de Diseño Industrial, Ed. 16 Carlos Arbeláez Camacho (Facultad de Arquitectura y diseño), Ed. 15 Leopoldo Rother (Aulas Arquitectura), Ed. 21 Emilio Arango S.J. (Central), Ed. 23 Cafetería Central, Ed. 03 Gabriel Giraldo S.J., Ed. 28 Jesús María Fernández S.J. (Biblioteca), Ed. 30 Néstor Santacoloma (Oncología), Ed. 31 Rafael Barrientos Conto (Aulas Medicina-Morfología), Ed. 32 Instituto de Genética Humana, Ed. 27 José de Carmen Acosta, Ed.24 Hospital de San Ignacio, Ed. 29 Urgencias H.U.S.I., Ed.25 Facultad de Odontología.



Figura 7. División del campus de la PUJB por zona alta, media y baja (Fuente: Adaptado Google, 2010)

### 3.2 DATOS DEL CAMPUS PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA SEDE BOGOTÁ

Para la determinación de las áreas aferentes en el campus se utilizaron los planos (i) "Levantamiento Topográfico Campus Pontificia Universidad Javeriana – Planta General" y (ii) "Alcantarillado Existente Campus Universidad Javeriana", suministrados por la Dirección de Recursos Físicos de la Universidad.

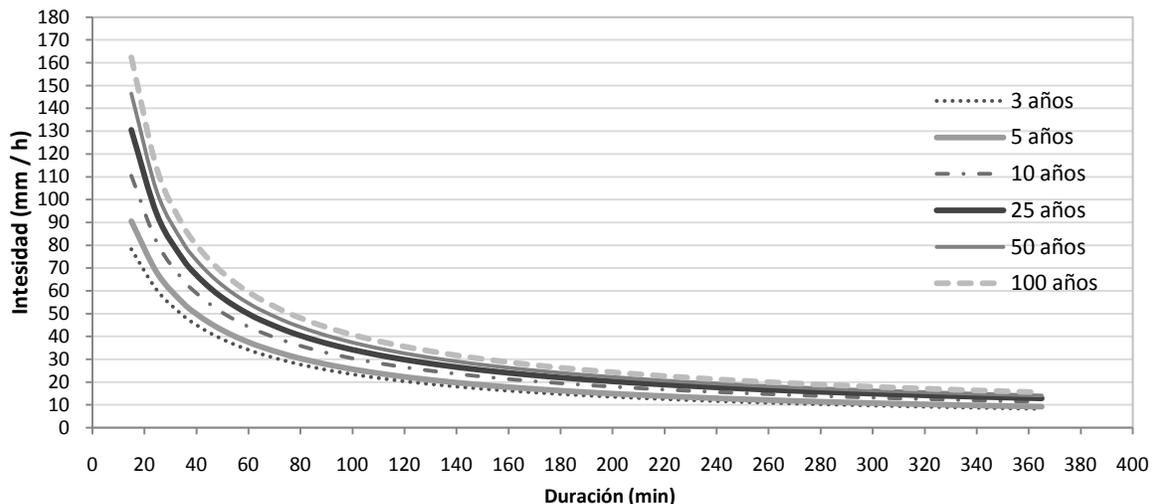
Adicionalmente, para conocer el consumo de agua de la Universidad se contó con el Análisis del Consumo de Agua en el Campus realizado por Estupiñán y Zapata (2010), utilizaron información relativas a las CUENTAS CONTRATO de los diferentes contadores de agua repartidos en todo el campus de la Universidad suministradas por la EAAB en marco del Convenio Interinstitucional de Cooperación para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (Convenio No. 9-07-26100-1060-2008), y se contó con el inventario de usos del agua en el campus desarrollado por los mismos autores.



### 3.3 DATOS HIDROLÓGICOS

Se utilizaron los datos provenientes de la Estación San Luis ubicada en el río Arrayanes (tipo: Pluviográfica, latitud: 4°39', longitud: 74°03' y elevación: 2959,00). Se cuenta con 75 años de registros diarios, desde 1936 hasta el 2010. A partir de estos datos se estimó el año típico promedio (con los promedios mensuales multi-anales) y un año representativo con los valores mínimo y máximo (Anexo 1).

Adicionalmente, se adoptaron las curvas de Intensidad Duración y Frecuencia (IDF) de la Estación San Luis (con los parámetros de la ecuación de ajuste) (Figura 8). Estas curvas fueron realizadas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB en el “Estudio y Revisión de las curvas IDF y del Análisis Espacial de las Tormentas Curvas PADF para la sabana de Bogotá” en el 2005.



PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DE AJUSTE						
PARÁMETRO	Tr 3 Años	Tr 5 Años	Tr 10 Años	Tr 25 Años	Tr 50 Años	Tr 100 Años
C <sub>1</sub>	1365.43	1258.03	1205.66	1213.61	1256.37	1298.95
X <sub>0</sub>	12.8	8.8	5.6	3.1	1.9	1
C <sub>2</sub>	-0.86	-0.83	-0.79	-0.77	-0.76	-0.75

Figura 8. Curvas IDF de las Estación San Luis (Adaptado de: EAAB, 2005)

### 3.4 CRITERIOS PARA EVALUAR LAS ALTERNATIVAS

La definición de criterios se basó en el estudio realizado por Martin *et al.* (2007), los cuales cubren los siguientes aspectos: (i) técnicos, (ii) hidráulicos, (iii) ambientales, (iv) sociales, (v) planeación, (vi) Económicos y (vii) operación y mantenimiento. Los criterios definitivos (Tabla 7) se concretaron mediante un trabajo participativo con la Dirección de Plantas Físicas del Campus y con el apoyo del ingeniero Jaime Andrés Lara B.



Tabla 7. Criterios definidos para la evaluación de las alternativas (Fuente: elaboración propia)

<b>Rendimiento hidráulico:</b>	Es la capacidad que tiene cada alternativa de cumplir el objetivo del sistema pluvial, drenaje y control de las aguas lluvias generadas en la zona
<b>Eficiencia de retención de contaminantes:</b>	Es la capacidad que tiene cada alternativa para retener contaminantes, esta se evalúa como un porcentaje de reducción de contaminantes entre la entrada y la salida del sistema
<b>Probabilidad de falla del sistema:</b>	Este criterio determina la probabilidad que la estructura falle y no pueda cumplir su función.
<b>Necesidad y frecuencia de operación y mantenimiento</b>	Este criterio determina qué tan frecuente es la necesidad de operar y mantener el sistema para que tenga un funcionamiento adecuado.
<b>Nivel de compatibilidad con plan maestro:</b>	Es la no interferencia de cada alternativa con las políticas de desarrollo del campus.
<b>Impacto en fase de construcción Vs. cobertura:</b>	Este indicador muestra qué tanto impacta la construcción de la alternativa comparada con la cobertura que brindaría esta alternativa
<b>Valor Presente Neto (VPN):</b>	Representa el valor equivalente en pesos de hoy, de la ganancia o pérdida que se obtendrá al construir y operar cada alternativa
<b>Tasa Interna de Retorno del proyecto Vs. Tasa Interna de Retorno de otro proyecto externo:</b>	Este indicador permite comparar la TIR de cada alternativa con respecto a otra TIR de un proyecto externo a la universidad (p.e. un proyecto de inversión)

### 3.5 ENCUESTA

Se realizó una encuesta (Anexo 2) para la determinación de los pesos de los criterios. Esta se realizó al personal de la Dirección de Recursos Físicos de la Universidad Lina Marcela Achury Uribe, Javier Forero Torres, Pebles Fragozo Rodelo y Juan Pablo Vargas Triana. Adicionalmente, se consultaron a ingenieros externos expertos en el tema: Carlos Alfonso Devia Castillo, Jaime Andrés Lara Borrero, Sandra Méndez Fajardo, Alejandra Ruiz López y David Andrés Zamora Ávila.

Los resultados de la encuesta se muestran en la Tabla 8 y la Figura 9 y en la Figura 10 se exponen los resultados del promedio de los pesos definidos por el personal de Recursos Físicos, el promedio definido por el personal externo y el promedio de todas las respuestas.



Tabla 8. Resultados encuesta para la ponderación de criterios (Fuente: elaboración propia)

Criterios	Carlos Devia	Sandra Méndez	Jaime Lara	Alejandra Ruiz	David Zamora	Javier Forero	Juan Pablo Vargas	Lina Achury	Pebles Fragozo
Rendimiento hidráulico	12.5%	16.0%	35.7%	17.9%	13.6%	25.0%	3.3%	15.6%	11.5%
Eficiencia de retención de contaminantes	12.5%	20.0%	21.4%	17.9%	22.7%	5.0%	10.0%	15.6%	11.5%
Probabilidad de falla del sistema	12.5%	20.0%	7.1%	17.9%	13.6%	5.0%	16.7%	3.1%	11.5%
Necesidad y frecuencia de operación y mantenimiento	12.5%	12.0%	7.1%	17.9%	22.7%	25.0%	10.0%	3.1%	3.8%
Contribución a las políticas de desarrollo del campus	12.5%	12.0%	7.1%	10.7%	13.6%	25.0%	16.7%	15.6%	3.8%
Impacto en fase de construcción Vs. cobertura	12.5%	8.0%	7.1%	3.6%	4.5%	5.0%	10.0%	15.6%	19.2%
Valor Presente Neto (VPN)	12.5%	8.0%	7.1%	3.6%	4.5%	5.0%	16.7%	15.6%	19.2%
Tasa Interna de Retorno Vs. Tasa Inversión Externa	12.5%	4.0%	7.1%	10.7%	4.5%	5.0%	16.7%	15.6%	19.2%

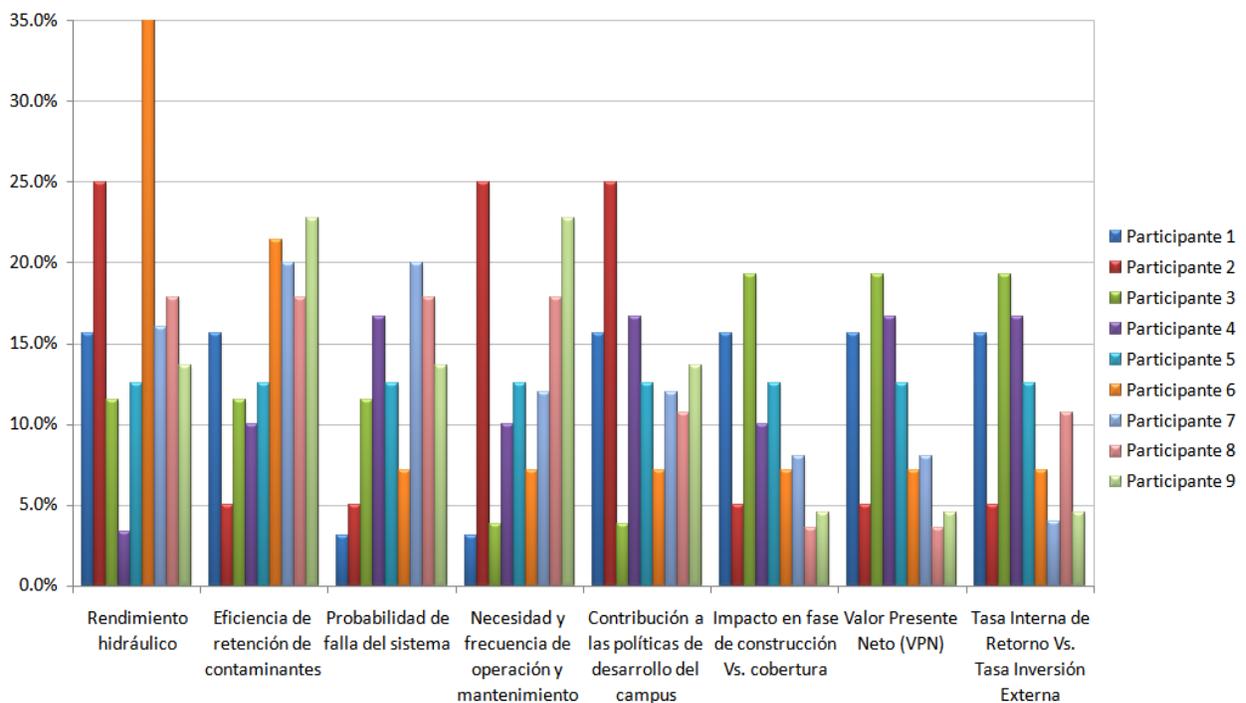
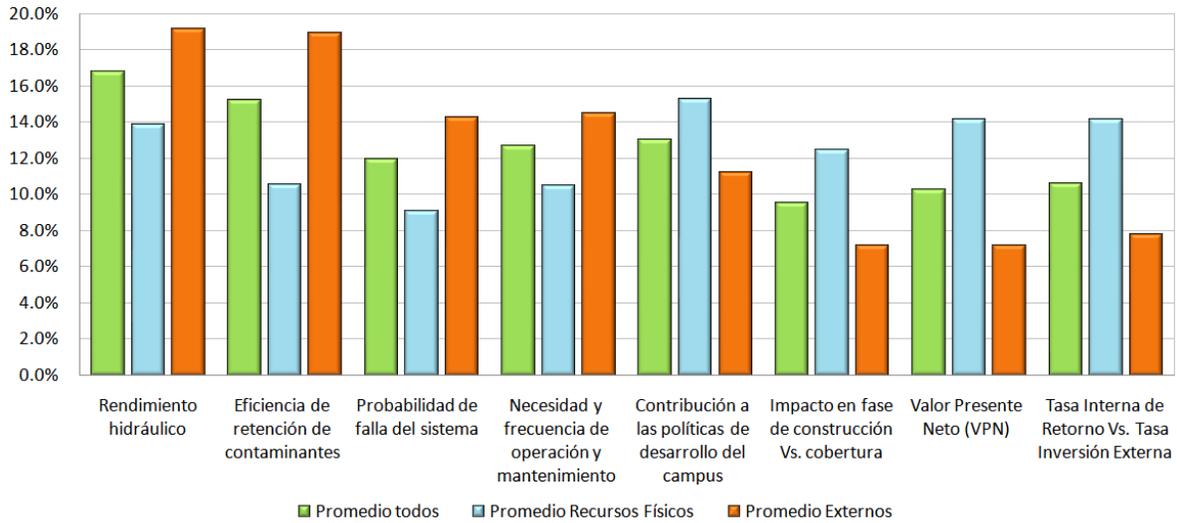


Figura 9. Definición de pesos de los criterios de evaluación de las alternativas, para cada uno de los participantes (Fuente: elaboración propia)



**Figura 10.** Promedios de los Pesos de los Criterios, Promedio todos (el promedio con todas las respuestas), promedio Recursos Físico (promedio con sólo los participantes de la Dirección de Recursos Físicos de la Universidad), Promedios Externos (promedio con los participantes externos) (Fuente: elaboración propia)

### 3.6 MATLAB®

El nombre de MatLab proviene de Matrix Laboratory dado que el tipo de dato básico que maneja es la matriz (Gilat, 2005). Matlab es un lenguaje de programación de alto nivel y un ambiente interactivo para el desarrollo de algoritmos, visualización de datos, análisis de datos y computación numérica. Usando Matlab se puede realizar tareas de cálculo complejas de forma más eficiente que con los lenguajes de programación tradicionales, como C, C++ y Fortran (Mathworks, 2011).

Matlab tiene una extensa librería de programas predefinidos o funciones diseñadas para ayudar a los usuarios a solucionar sus problemas de forma más eficiente, tiene más de 40 cajas de herramientas (toolboxes) para diferentes temas de estudio. Un de las ventajas frente a otros lenguajes de computación, es que un nuevo programa puede ser desarrollado usando las funciones predefinidas lo cual lo hace más corto (Sighn y Chaudhuri, 2007).

## 4 HERRAMIENTA DESARROLLADA CRIDE

La técnica de análisis multi-criterio escogida para desarrollo de la herramienta CRIDE fue el método ELECTRE II, el cual hace parte de los métodos de relaciones de superación. Las razones que justifican escoger a ELECTRE II son las siguientes: (i) permite un diálogo entre los diferentes tomadores de decisiones involucrados en el proceso de toma de decisiones, (ii) los criterios pueden ponderarse, lo cual permite que cada tomador de decisión pueda dar su opinión y expresar sus diferencias, (iii) las alternativas se comparan por pares, definiendo las relaciones de superación (qué tanto supera una alternativa a la otra) y relaciones de diferencia (qué tanta diferencia existe entre las alternativas), (iv) admite el uso de escalas ordinales para la calificación de las alternativas, sin necesidad de convertir las escalas originales en abstractas con un rango impuesto (en comparación de ELECTRE I), (v) no requiere la definición arbitraria o por medio de encuestas de varios umbrales lo cual complica la obtención de datos y sesga los resultados, sólo usa el umbral de concordancia en comparación con ELECTRE III (el cual requiere la definición de los umbrales difusos de indiferencia, de preferencia y el de veto) (Martin *et al.*, 2007; Figueira *et al.*, 2009).

Con la metodología de AMC descrita anteriormente ELECTRE II y la generación de valores aleatorios entre las calificaciones máximas y mínimas de las alternativas respecto a los criterios, se desarrolló *CRIDE*<sup>1</sup> (herramienta de análisis multi-criterio para la toma de DEcisiones) en MatLab®, el código se encuentra en el Anexo 5 Herramienta desarrollada CRIDE. Esta herramienta contempla toda la variabilidad en los datos de entrada.

Como experiencia previa y apoyo al desarrollo de la herramienta CRIDE, esta se implementó (sin considerar aleatoriedad) en el soporte para la selección de la comunidad objetivo del PROgrama SOCIAL de la Facultad de Ingeniería (PROSOFI) de la Pontificia Universidad Javeriana (Galarza Molina *et al.*, 2010), permitiendo identificar errores. Adicionalmente, se colocó a prueba la herramienta implementando un ejemplo del libro Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbres (Smith *et al.*, 2000).

CRIDE está dividida en las siguientes opciones:

- (i) *Opción 0:* es la opción que no considera aleatoriedad, se utiliza la matriz de posibles soluciones promedio, los pesos de los criterios promedio y los umbrales de concordancia definidos por el usuario
- (ii) *Opción 1:* es la opción que sólo varía la matriz de posibles soluciones entre los valores mínimos y máximos, utiliza los pesos de los criterios promedio y los umbrales de concordancia definidos por el usuario
- (iii) *Opción 2:* sólo se varían los pesos de los criterios entre los valores mínimos y máximos definidos por los participantes en la encuesta, y emplea la matriz de posibles soluciones promedio y los umbrales de concordancia definidos por el usuario

---

<sup>1</sup> Originalmente Cride es una palabra de origen celta que significa “corazón” (Davis, 2001, p.106).

- (iv) *Opción 3:* se varían tanto la matriz de posibles soluciones como los pesos de los criterios, y se utilizan los umbrales de concordancia definidos por el usuario
- (v) *Opción 4:* se utiliza la matriz de posibles soluciones promedio y los pesos de los criterios promedio, solamente se varían los umbrales de concordancia
- (vi) *Opción 5:* considera la variación de la matriz de posibles soluciones, los pesos de los criterios y los umbrales de concordancia.

#### 4.1 CRIDE – OPCIÓN 0

En CRIDE – Opción 0 no se considera variación de los datos de entrada. Se utilizan la matriz de posibles soluciones promedio, el peso de los criterios promedio y los umbrales de concordancia definidos por el usuario, los cuales deben cumplir con las siguientes inecuaciones (20):

$$\begin{aligned}
 1 &\leq C_{min,1} \leq 0.7; & (20) \\
 0.6 &\leq C_{min,2} \leq C_{min,1} \\
 0.5 &\leq C_{min,3} \leq C_{min,2}
 \end{aligned}$$

A nivel general en CRIDE no es necesario ajustar la escala de la evaluación de las alternativas en la matriz de posibles soluciones (Figura 11).

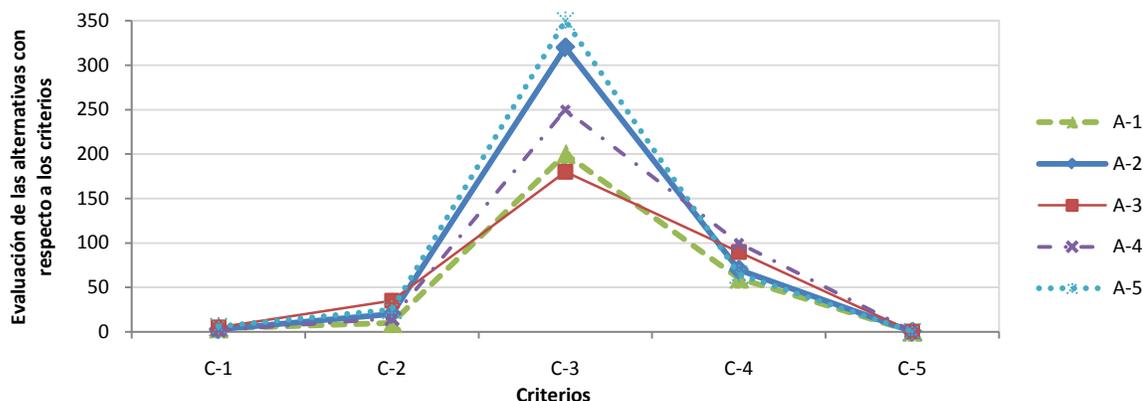


Figura 11. Ejemplo de la escala de las evaluaciones de cada una de las alternativas (A-1, A-2, A-3, A-4 y A-5) con respecto a los criterios C-1, C-2, C-3, C-4 y C-5 (Fuente: elaboración propia)

En la Figura 12 se describen los datos de entrada de esta opción de la herramienta y los datos de salida.

#### 4.2 CRIDE – OPCIÓN 1

En CRIDE – Opción 1 la matriz de posibles soluciones varía entre valores mínimos y máximos (Figura 13). La aleatoriedad entre estos valores se determinó implementando una distribución de probabilidad normal y/o uniforme lo cual depende del criterio mediante el método de Monte Carlo.

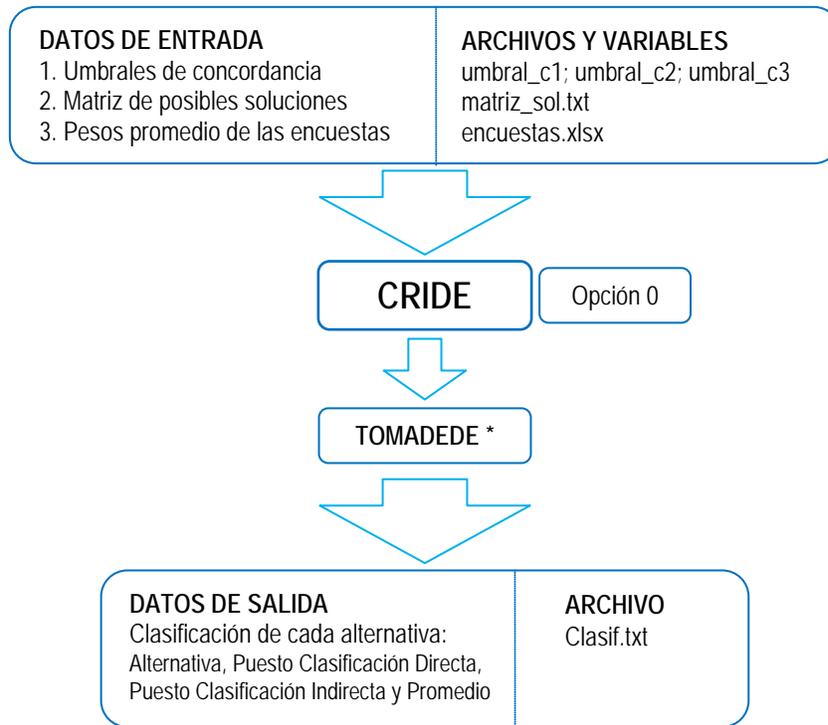


Figura 12. Opción 0 de CRIDE, datos de entrada y salida (\*ver figura 22) (Fuente: elaboración propia)

Los pesos de los criterios y los umbrales de concordancia no varían, se usan los pesos de los criterios promedio y los umbrales de concordancia definidos por el usuario.

Para determinar el número de simulaciones mínimas de CRIDE en esta opción, se acumula la frecuencia de la posición de cada alternativa a lo largo de 10.000 simulaciones y se grafican. Cuando se observe que los puestos de las alternativas se estabilizaban, es decir tienden a ocupar el mismo puesto, ese es el número de simulaciones mínimas requeridas.

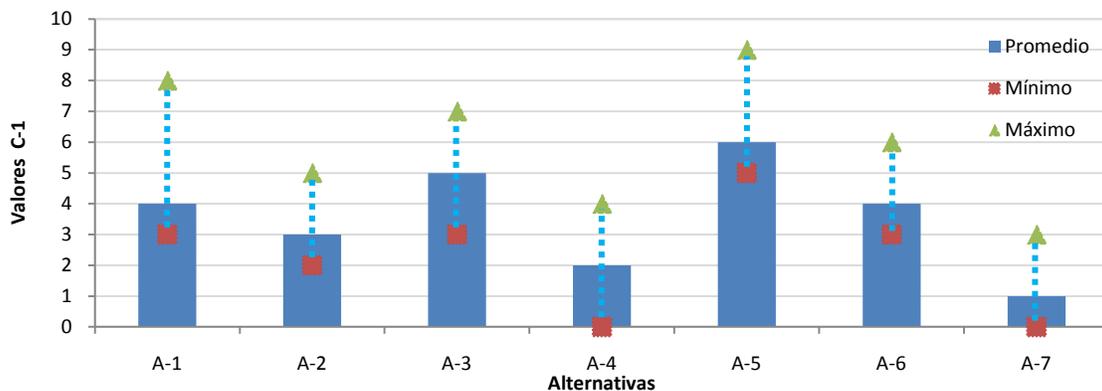


Figura 13. Ejemplo de los valores máximos, mínimos y promedios evaluando a las alternativas (A-1, A-2, A-3, A-4 y A-5) con respecto al criterio C-1. Entre el rango expuesto por la línea punteada se generan los valores aleatorios (Fuente: elaboración propia).

En la Figura 14 se describen los datos de entrada de esta opción de la herramienta y los datos de salida.

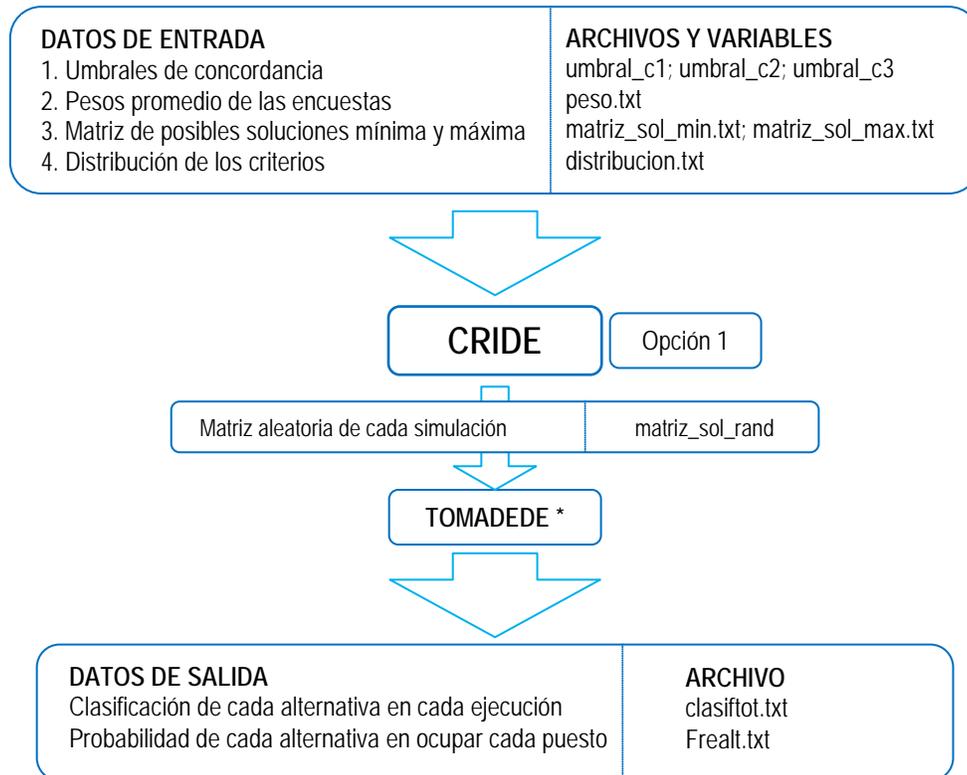


Figura 14. Opción 1 de CRIDE, datos de entrada y salida (\*ver figura 22) (Fuente: elaboración propia)

Para la clasificación final de las alternativas el archivo *clasifot.txt* almacena el puesto que ocupó cada alternativa en cada simulación y con este archivo se evalúa la probabilidad que obtuvo cada alternativa en cada uno de los puestos creando el archivo *Freal.txt*. La alternativa ganadora es la que obtenga mayor probabilidad en ocupar el puesto 1, la segunda es la que tenga la segunda mayor probabilidad de obtener el puesto 1 y así sucesivamente (Figura 15).

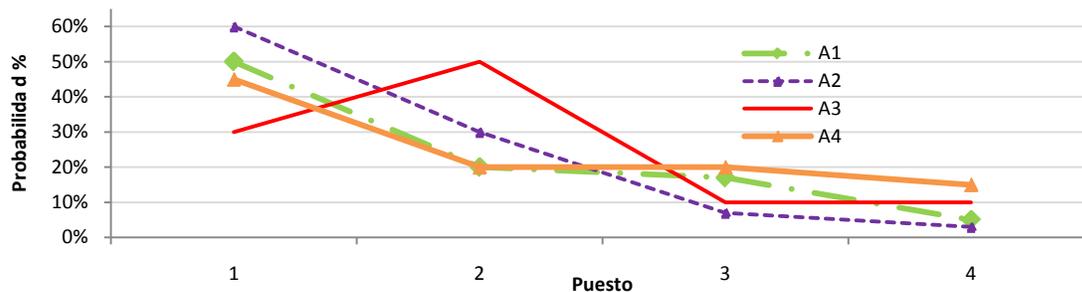
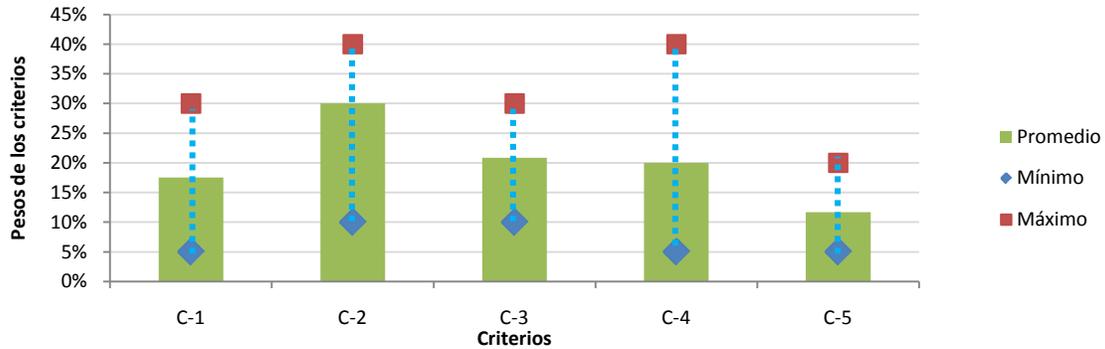


Figura 15. Ejemplo de las probabilidades de cada alternativa en ocupar los puestos, la mejor alternativa es la A2, seguida por la A1, luego la A4 y ocupando el último puesto la A3 (Fuente: elaboración propia)

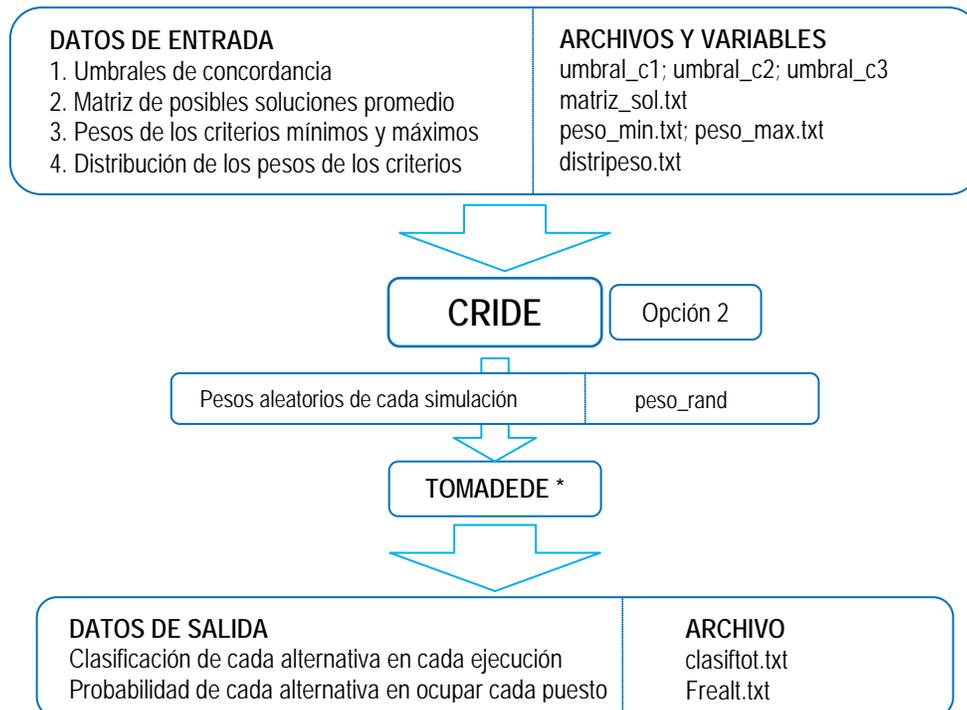
### 4.3 CRIDE – OPCIÓN 2

En CRIDE – Opción 2 los pesos de los criterios varían entre valores mínimos y máximos de los resultados de las encuestas realizadas (Figura 16). La aleatoriedad entre estos valores se determinó implementando una distribución de probabilidad uniforme mediante el método de Monte Carlo. El número de simulaciones es el mismo definido anteriormente en CRIDE opción 1.



**Figura 16.** Ejemplo de los valores máximos, mínimos y promedios de los pesos de cada uno de los criterios (C-1, C-2, C-3 C-4 y C-5). Entre el rango expuesto por la línea punteada se generan los valores aleatorios (Fuente: elaboración propia)

La matriz de posibles soluciones y los umbrales de concordancia no varían, se usan la matriz promedio y los umbrales de concordancia definidos por el usuario. En la Figura 17 se describen los datos de entrada de esta opción de la herramienta y los datos de salida.



**Figura 17.** Opción 2 de CRIDE, datos de entrada y salida (\*ver figura 22) (Fuente: elaboración propia)

#### 4.4 CRIDE – OPCIÓN 3

En CRIDE – Opción 3 la matriz de posibles soluciones y los pesos de los criterios varían entre valores mínimos y máximos (Figura 13 y Figura 16). La aleatoriedad entre estos valores se determinó implementando una distribución de probabilidad uniforme para el caso de los pesos y normal y/o uniforme para el caso de los criterios, mediante el método de Monte Carlo. Los umbrales de concordancia no varían y son definidos por el usuario. El número de simulaciones es el mismo definido anteriormente en CRIDE opción 1.

En la Figura 18 se describen los datos de entrada de esta opción de la herramienta y los datos de salida.

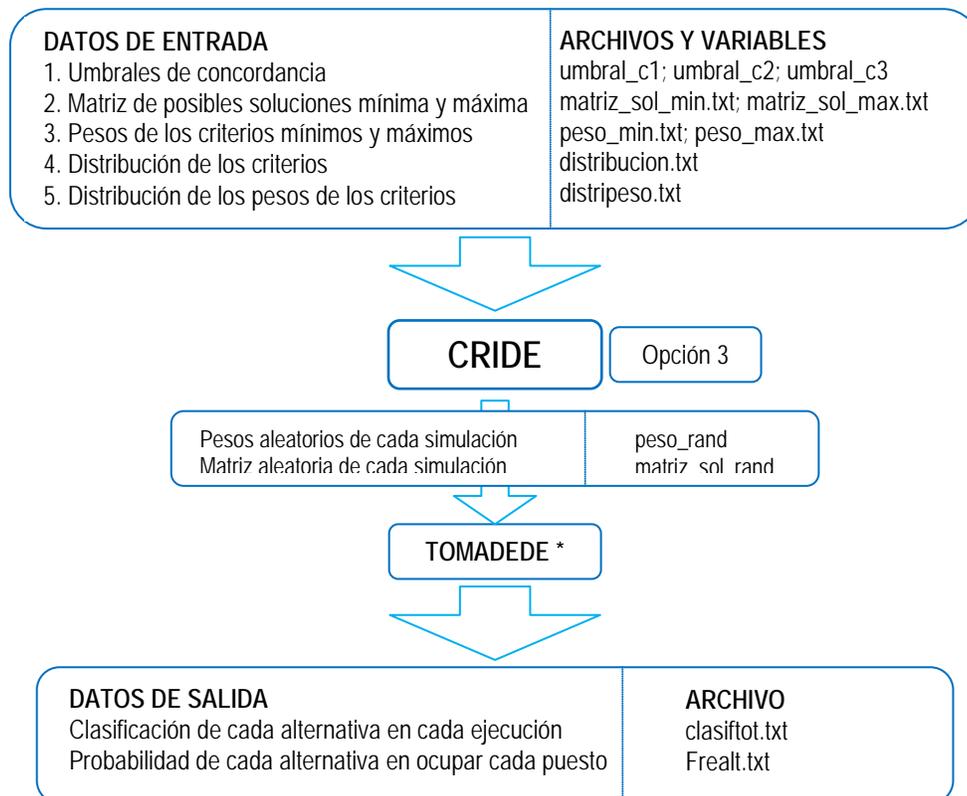


Figura 18. Opción 3 de CRIDE, datos de entrada y salida (\*ver figura 22) (Fuente: elaboración propia)

#### 4.5 CRIDE – OPCIÓN 4

En CRIDE – Opción 4 los umbrales de concordancia varían entre los valores mínimos y máximos de cada umbral (de acuerdo a las inequaciones (20)) (Figura 19). La aleatoriedad entre estos valores se determinó implementando una distribución de probabilidad uniforme mediante el método de Monte Carlo. El número de simulaciones es el mismo definido anteriormente en CRIDE opción 1.

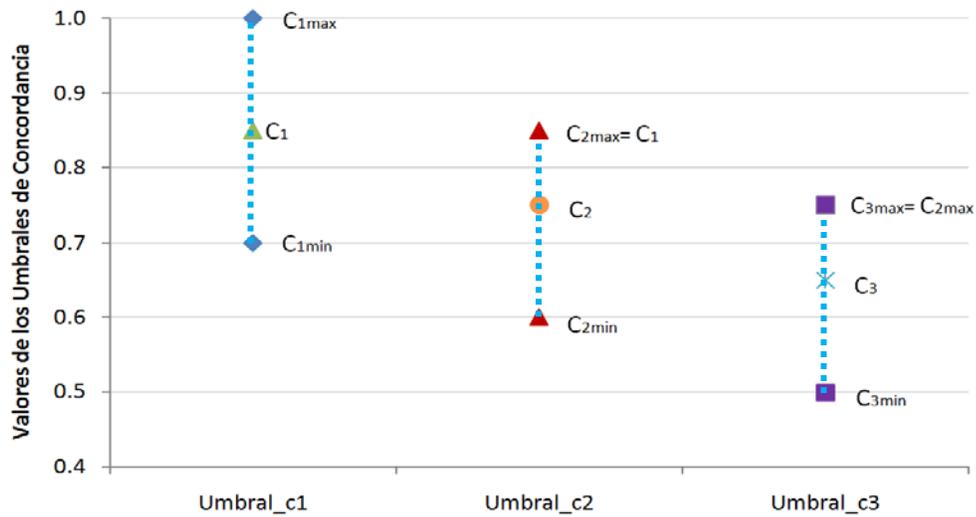


Figura 19. Ejemplo de los valores de los Umbrales C1, C2 y C3. Entre el rango expuesto por la línea punteada se generan los valores aleatorios (Fuente: elaboración propia)

La matriz de posibles soluciones y los pesos de los criterios no varían, se usan la matriz promedio y los pesos promedio. En la Figura 20 se describen los datos de entrada de esta opción de la herramienta y los datos de salida.

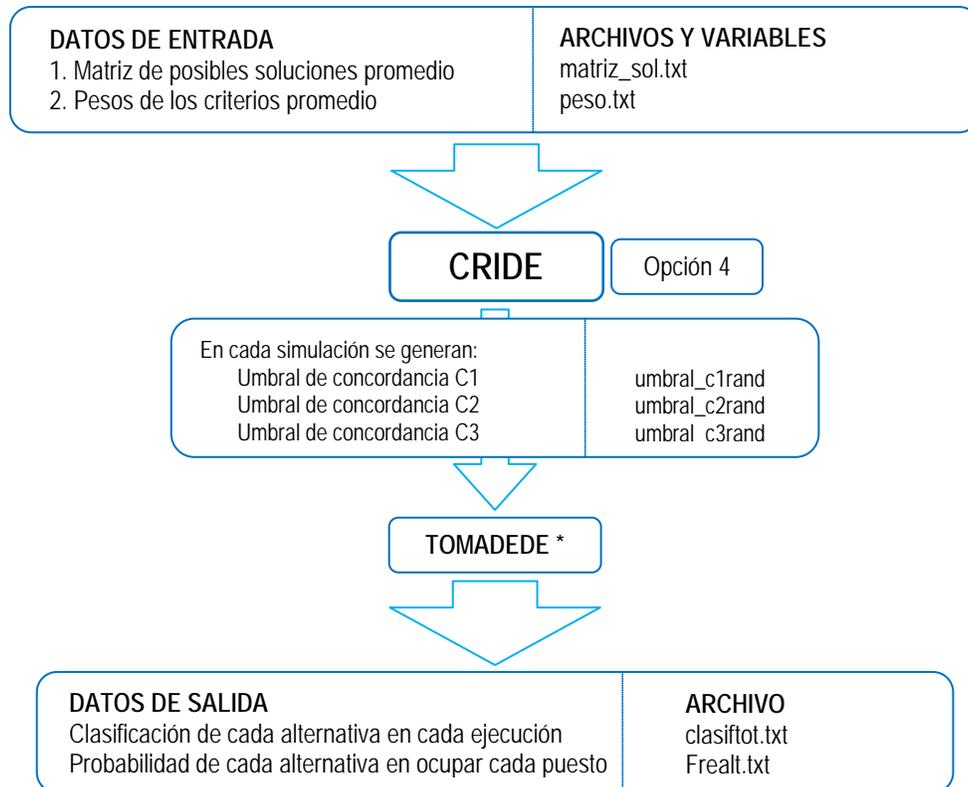


Figura 20. Opción 4 de CRIDE, datos de entrada y salida (\*ver figura 22) (Fuente: elaboración propia)

## 4.6 CRIDE – OPCIÓN 5

En CRIDE – Opción 5 la matriz de posibles soluciones, los pesos de los criterios y los umbrales de concordancia varían. La aleatoriedad para estas variables se determinó implementando una distribución de probabilidad uniforme para el caso de los pesos y los umbrales (Figura 16 y Figura 19) y normal y/o uniforme para el caso de los criterios (Figura 13), mediante el método de Monte Carlo. El número de simulaciones es el mismo definido anteriormente en CRIDE opción 1.

En la Figura 21 se describen los datos de entrada de esta opción de la herramienta y los datos de salida.

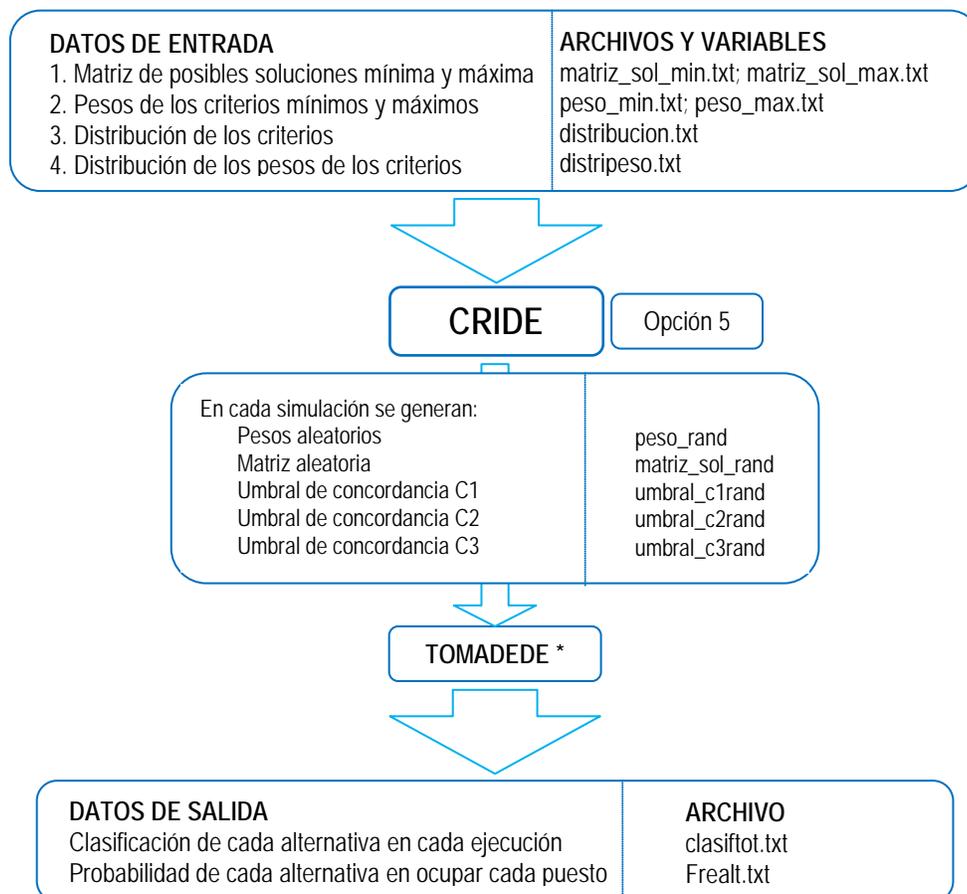


Figura 21. Opción 5 de CRIDE, datos de entrada y salida (\*ver figura 22) (Fuente: elaboración propia)

## 4.7 RUTINAS QUE CONFORMAN A CRIDE

La herramienta desarrollada CRIDE emplea la rutina clasificatoria TOMADEDE (Figura 22), que a su vez está compuesta por tres subrutinas llamadas *GRAFOS*, *SACAR* y *CLASIFIC*.

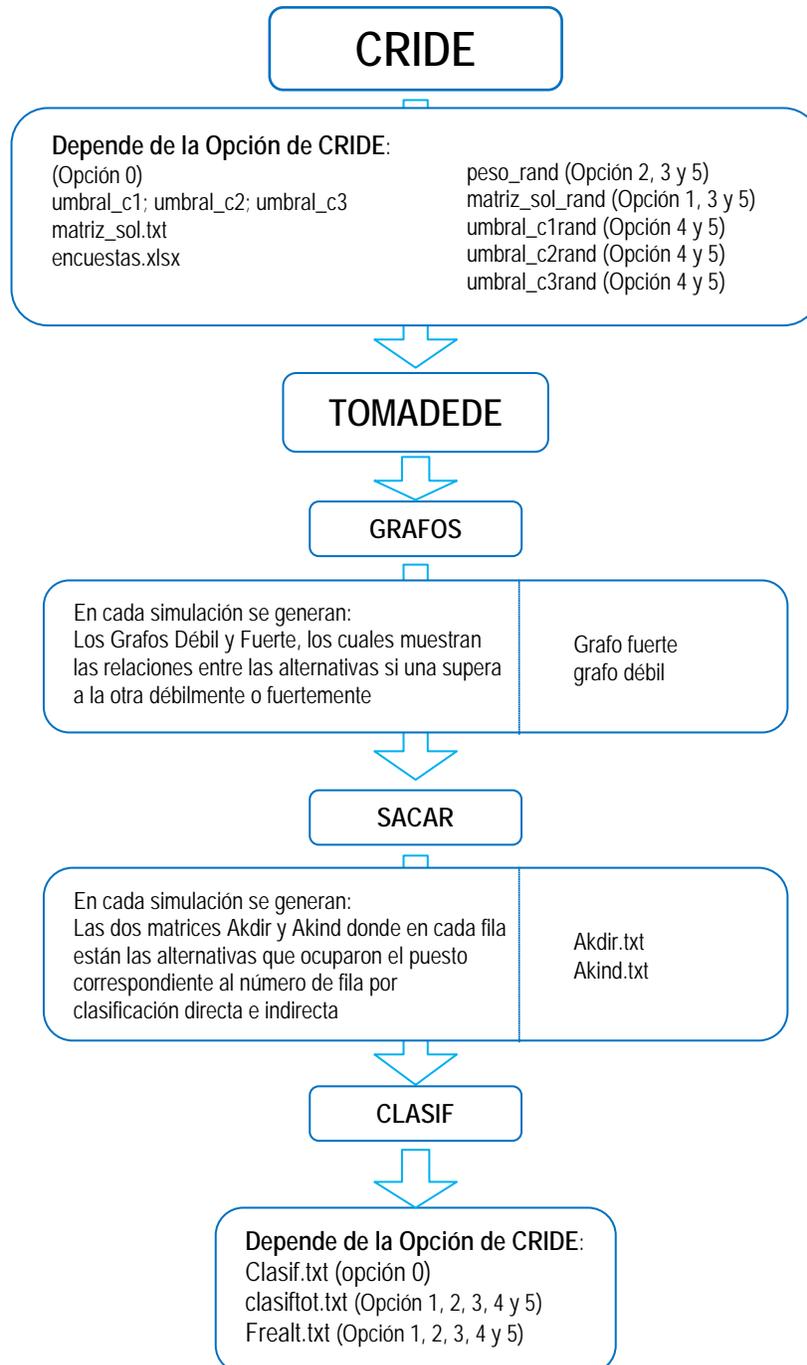


Figura 22. Subrutinas utilizadas por CRIDE (Fuente: elaboración propia)

*GRAFOS* es la primera subrutina utilizada por *TOMADEDE*, la cual define los grafos débil y fuerte a partir de la matriz de soluciones y los umbrales de concordancia y discordancia. Tanto la matriz de soluciones como los umbrales de concordancia son datos de entrada. Por otro lado, los umbrales de



discordancia (dos por criterio) se determinan por medio de las máximas diferencias entre las alternativas de cada criterio: percentil 20 para el primer umbral ( $d_{max,1}$ ) y percentil 35 para el segundo umbral ( $d_{max,2}$ ).

Después de definir los grafos continúa el proceso con la clasificación directa e indirecta en *TOMADEDE*. Dentro de estos dos procesos se utiliza la subrutina *SACAR*, la cual se encarga de ir extrayendo de los grafos cada una de las alternativas evaluadas. De estos dos procesos se obtienen dos matrices *Akdir* y *Akind*, en las cuales cada fila equivale a la posición de clasificación.

Con las dos matrices de posición de clasificación (*Akdir* y *Akind*) inicia el proceso de ponderaciones de las clasificaciones para obtener el puesto definitivo, esto se hace a través de la subrutina *CLASIFIC*.

Por último en la Tabla 9 se listan las variables y los archivos utilizados en la herramienta desarrollada CRIDE con una breve descripción.



Tabla 9. Descripción de los archivos y datos empleados en CRIDE (Fuente: elaboración propia)

Nombre	Descripción
encuestas.xlsx	Archivo en Excel el cual contiene las respuestas de los pesos de los criterios. Es una matriz $n \times m$ , donde $n$ es el número de criterios y $m$ el total de participantes (valor expresado en fracciones)
martiz_sol.txt	Archivo en formato texto, contiene la evaluación de cada alternativa respecto a los criterios. Es una matriz $n \times m$ , donde $n$ es la cantidad de criterios y $m$ el número de alternativas.
umbral_c1 umbral_c2 umbral_c3	Son los umbrales concordancia, la herramienta los solicita cuando se ejecuta alguna de las siguientes opciones: (i) ELECTRE II, (ii) M alea, (iii) P alea y (iv) MyP alea. El umbral_c1 debe ser mayor a 0.7, el umbral_c2 mayor a 0.6 y menor a umbral_c1, y el umbral_c3 menor al umbral_c2 y mayor a 0.5.
matriz_sol_max.xlsx	Archivo en Excel el cual contiene la evaluación máxima de cada alternativa respecto a los criterios. Es una matriz $n \times m$ , donde $n$ es la cantidad de criterios y $m$ el número de alternativas.
matriz_sol_min.xlsx	Archivo en Excel el cual contiene la evaluación mínima de cada alternativa respecto a los criterios. Es una matriz $n \times m$ , donde $n$ es la cantidad de criterios y $m$ el número de alternativas.
distribución.txt	Archivo en formato texto el cual contiene la distribución de probabilidad definida para cada criterio, en un vector columna de $n$ filas, donde $n$ es el número de criterios.
peso.txt	Archivo en formato texto el cual contiene los pesos promedios de cada criterio, es un vector columna de $n$ filas, donde $n$ es el número de criterios.
peso_max.txt	Archivo en formato texto el cual contiene los pesos máximos de cada criterio, es un vector columna de $n$ filas, donde $n$ es el número de criterios.
peso_min.txt	Archivo en formato texto el cual contiene los pesos mínimos de cada criterio, es un vector columna de $n$ filas, donde $n$ es el número de criterios.
distripeso.txt	Archivo en formato texto el cual contiene la distribución de probabilidad definida para los pesos de los criterios, en un vector columna de $n$ filas, donde $n$ es el número de criterios.
matriz_sol_rand	Es la matriz de posibles soluciones aleatoria, se obtiene de los datos de entrada: matriz_sol_min.xlsx, matriz_sol_max.xlsx y distribución.txt. Es una matriz $n \times m$ , donde $n$ es la cantidad de criterios y $m$ el número de alternativas. matriz_sol_rand es la matriz que entra a la rutina TOMADEDE.
peso_rand	Es el vector columna de los pesos de los criterios aleatorios, se obtiene de los datos de entrada: peso_min.txt, peso_max.txt y distripeso.txt. Es un vector columna de $n$ filas, donde $n$ es el número de criterios. peso_rand es el vector columna que entra a la rutina TOMADEDE.
umbral_c1rand umbral_c2rand umbral_c3rand	Son los umbrales concordancia que se generan aleatoriamente y entran a la rutina TOMADEDE
clasif.txt	Es un archivo de resultados en formato texto. Presenta los resultados ejecutando CRIDE sin aleatoriedad ELECTRE II, en forma de matriz $n \times 4$ , donde $n$ es el número de alternativas. Las columnas son Alternativa, Puesto clasificación directa (Pdir), Puesto clasificación indirecta (Pind) y puesto promedio
clasiftot.txt	Es un archivo de resultados en formato texto. Presenta los puestos de las alternativas ejecutando CRIDE con aleatoriedad, en forma de matriz $n \times m$ , donde $n$ es el número de simulaciones y $m$ son las alternativas.
Frealt.txt	Es un archivo de resultados en formato texto. Presenta la probabilidad de las alternativas en cada ocupar cada puesto ejecutando CRIDE con aleatoriedad, en forma de matriz $n \times m$ , donde $n$ es el número de puestos y $m$ son las alternativas.

## 5 RESULTADOS OBTENIDOS AL APLICAR LA HERRAMIENTA DESARROLLADA

El objetivo de este trabajo de grado es el desarrollo de un herramienta de análisis multi-criterio para el soporte de toma de decisiones en el aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la PUJB. Para poner a prueba la herramienta se construyeron alternativas para el aprovechamiento de las aguas lluvias utilizando los criterios propuestos, las encuestas efectuadas, los datos de las cuentas contrato de la Universidad Javeriana y la información hidrológica.

La construcción de estas alternativas (escenarios) se realizó a nivel de factibilidad los SUDS implementados, los requerimientos de bombeo y los sistemas de tratamiento se pre-dimensionaron. El diseño detallado es un trabajo exhaustivo requiere un mayor nivel de detalle para la construcción de los escenarios con diseños específicos, realizando más encuestas e investigando mejor los indicadores de los SUDS.

A continuación se presenta la metodología para la construcción de la matriz de posibles soluciones, su aplicación en la herramienta desarrollada y los resultados obtenidos.

### 5.1 METODOLOGÍA PROPUESTA

#### 5.1.1 Definición de cuencas en el campus de la PUJ sede Bogotá

Se definieron 12 cuencas en el campus de la Universidad basándose en las características de drenaje, tanto superficial como a partir de la topología de la red de alcantarillado y utilizando los planos suministrados por la Dirección de Recursos Físicos de la Universidad (Figura 23). En la Tabla 10 se describen las cuencas con sus áreas aferentes.



Figura 23. Cuencas definidas en el campus de la PUJ (Adaptado de: Dirección de Recursos Físicos, 2010)

### 5.1.2 Pre-dimensionamiento de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

Para la recolección de la escorrentía se propone el uso de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), los sistemas escogidos fueron Jardines de Bioretención, Pavimentos Permeables y Humedales artificiales. Se escogieron estos sistemas debido a sus capacidades de detención y aprovechamiento de aguas lluvias, en el caso de los Humedales artificiales y los Jardines de Bioretención por sus beneficios estéticos y ecológicos (CIRIA, 2007).

La selección del SUDS a emplear en cada cuenca se realizó basándose en las características de los posibles lugares (su uso actual y criterios estéticos) (Figura 24 y Tabla 10). Para la cuenca 1 se definió el uso un Jardín de Bioretención debido a que el posible lugar es el frente al edificio Barón en el cual actualmente hay un jardín. En la cuenca 2 la ubicación del SUDS es frente al edificio de odontología (Edificio 27) esta zona es peatonal por lo cual se proyectó un Pavimento Permeable con cobertura en adoquines, lo mismo sucede con las cuencas 6, 7 y 8.

**Tabla 10.** Áreas aferentes de cada una de las cuencas y sistemas alternativos definidos para cada cuenca (Fuente: elaboración propia)

CUENCA	Área (m <sup>2</sup> )	SUDS
Cuenca 1- Barón	7,493.6	Jardín Bioretención
Cuenca 2- Cancha de Fútbol	27,317.2	Pavimento permeable
Cuenca 3- Ingeniería -	32,43.5	Jardín Bioretención
Cuenca 4- Arquidiseño	1,123.2	Jardín Bioretención
Cuenca 5- Arabeláez	2,278.0	Pavimento permeable
Cuenca 6- Central	10,650.0	Pavimento permeable
Cuenca 7- Giraldo	6,872.0	Pavimento permeable
Cuenca 8 - Biblioteca	6,724.0	Pavimento permeable
Cuenca 9 - Pablo Vi	8,243.6	Humedal artificial
Cuenca 10 –Cotidiano	7,020.0	Pavimento permeable
Cuenca 11 - Félix	17,186.3	Humedal artificial
Cuenca 12 - Arboleda	8,101.0	Pavimento permeable

En las cuencas 3 y 4 se proyectó la construcción de dos Jardines de Bioretención, respectivamente, debido a que en estas zonas actualmente hay jardines. Para las cuencas 5 (el lugar escogido para ubicar el SUDS es en la zona continua al edificio 16 Carlos Arbeláez Camacho) y 10 (el lugar escogido para ubicar el SUDS es en la zona verde frente al Auditorio Felix Restrepo) se escogió el Pavimento Permeable con cobertura de pasto.

Se escogió utilizar un humedal artificial para las cuencas 9 y 11 en la zona verde continua a la estatua de San Francisco Javier (cuenca 9) y en la zona verde que está al costado nor-occidental del edificio 50 Félix Restrepo (cuenca 11), debido que en estas zonas está restringido el acceso al público y son amplias. Para la cuenca 12 se escogió el Pavimento Permeable con cobertura en adoquines debido a que el lugar es la zona dura donde está ubicado el OMA (al lado del edificio 32 Instituto de Genética Humana).

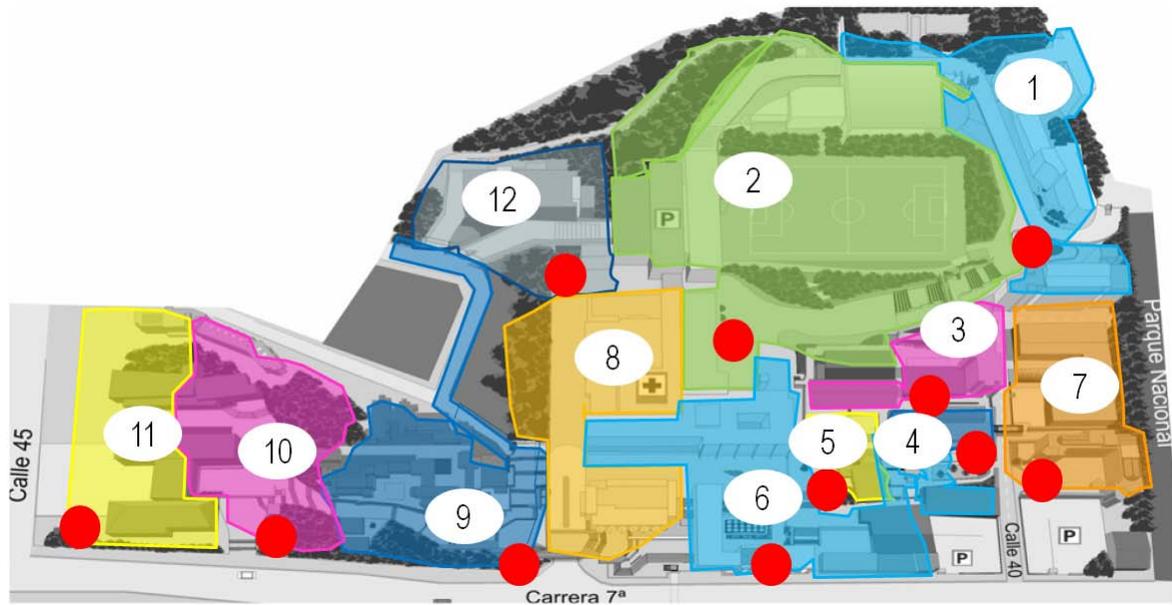


Figura 24. Posible ubicación de los SUDS en el Campus (círculos rojos) (Adaptado de: Dirección de Recursos Físicos, 2010)

En el Anexo 3 se encuentran las hojas de cálculo con el pre-dimensionamiento de los SUDS y los Costos Generales. Las dimensiones determinadas para cada una de los SUDS se muestran en la Tabla 11 para Jardines de Bioretención (PGCo, 2009), Tabla 12 para Pavimentos Permeables (Interpave, 2008) y en la Tabla 13 para Humedales artificiales (Kadlec *et al.*, 2009).

Tabla 11. Dimensiones de los Jardines de Bioretención (Fuente: Elaboración propia)

	Cuenca 1	Cuenca 3	Cuenca 4
Área (m <sup>2</sup> )	16.50	7.35	3.00
Profundidad (m)	0.80	0.80	0.80

Tabla 12 Dimensiones de los Pavimentos Permeables (Fuente: Elaboración propia)

	Área (m <sup>2</sup> )	Profundidad Base Granular (m)
Cuenca 2	616	1.10
Cuenca 5	195	0.60
Cuenca 6	270	1.30
Cuenca 7	230	0.90
Cuenca 8	210	1.10
Cuenca 10	400	0.40
Cuenca 12	320	0.90

Tabla 13 Dimensiones de los Humedales artificiales (Fuente: Elaboración propia)

	Cuenca 9	Cuenca 11
Área (m <sup>2</sup> )	86.80	120.00
Profundidad (m)	1.00	1.00

### 5.1.3 Determinación de la Demanda y la Oferta de agua en el Campus

Para obtener la demanda mensual se relacionaron las cuentas contrato y el inventario de usos de la universidad, estimando los consumos por cada edificio y en cada uno de los usos: (i) Potable, (ii) Lavado de pisos, (iii) Descarga de sanitarios y (iv) Riego.

Para cada cuenca la oferta se determinó de manera aproximada utilizando la precipitación acumulada mensual de la Estación San Luis, multiplicándose por el área aferente y por el coeficiente de escurrimiento ponderado de cada una de las cuencas.

### 5.1.4 Construcción de Escenarios - Alternativas

Se crearon 6 escenarios (alternativas) para ser evaluados por los criterios y así poder obtener la solución más deseable para el grupo decisor. Los escenarios se construyeron a partir de un escenario ideal, donde se aprovecharía toda el agua lluvia recogida en el campus (volumen máximo de oferta) con calidad de agua potable (Máxima calidad del agua). Fueron surgiendo los demás escenarios al ir disminuyendo la calidad del agua (menos usos) y la oferta (menos cuencas), obteniendo demanda de agua alta, media y baja y oferta de agua alta y media. La descripción detallada de cada uno de éstos se presenta a continuación.

#### a) Escenario 1

El escenario 1 contempla el uso de la mayoría de las áreas del campus, las 12 cuencas, para la recolección de las aguas lluvias y el aprovechamiento de estas aguas para todos los fines (agua potable, descarga de sanitarios, lavado de piso, riego). Este es el escenario donde la demanda y la oferta de agua son más altas y los requerimientos de calidad de agua son los más elevados. En la Tabla 14 se describen las cuencas y los edificios a los cuales se les irían a suministrar el agua.

#### b) Escenario 2

Este escenario contempla las 12 cuencas inicialmente planteadas, la diferencia está en que sólo se van a cubrir los usos no potables (lavado de pisos, descargas de sanitarios y riego), disminuyendo de esta manera la demanda por cada edificio y requerimientos de calidad del agua. Este es el escenario donde se contempla la demanda de agua media y la oferta más alta de agua.

#### c) Escenario 3

El escenario 3 sólo va a suplir el uso de riego, la calidad del agua va a ser menor que la del escenario 2. Este es el escenario donde se contempla la demanda de agua baja y la oferta más alta de agua.

#### d) Escenario 4

El escenario 4 contempla el uso de las cuencas 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11 y 12. Las cuencas 6, 7 y 8 no se tienen en cuenta en este escenario para la captación de aguas lluvias, se prefirieron eliminar estas cuencas que se encuentran en la parte baja del campus universitario. El suministro de agua para las



cuencas 6 y 8 proviene de las cuencas 5 y 2 respectivamente, para lo edificio 30 Néstor Santacoloma (ubicando en la cuenca 8) y el edificio 15 Leopoldo Rother (ubicado en la cuenca 6). La cuenca 7 es la única cuenca que no se tiene en cuenta tanto para suministro como para recolección. El agua recolectada en este escenario es para todos los usos. Este es el escenario donde la demanda de agua es alta y la oferta de agua es media.

**Tabla 14.** Cuencas con los edificios a suministrar agua, área y coeficiente de escorrentía C (Fuente: elaboración propia)

Cuenca	Edificio	Área (m2)	C promedio
Cuenca 1- Barón	Ed. 2 Fernando Barón	7,493.6	0.69
Cuenca 2- Cancha de Fútbol	Ed. 115 Guillermo Castro (Parqueadero)	27,317.2	0.56
	Ed. 30 Néstor Santacoloma (Oncología)		
Cuenca 3- Ingeniería	Ed. 11. José Gabriel Maldonado S.J. (Ingeniería)	3,243.5	0.78
Cuenca 4- Arquidiseño	Ed. 05 Talleres de Diseño Industrial	1,123.2	0.86
	Ed. 09 Julio Carrizosa		
Cuenca 5- Arbeláez	Ed. 16 Carlos Arbeláez Camacho	2,278.0	0.79
	Ed. 15 Leopoldo Rother		
Cuenca 6- Central	Ed. 21 Emilio Arango S.J. (Central)	10,650.0	0.79
Cuenca 7- Giraldo	Ed. 03 Gabriel Giraldo S.J.	6,872.0	0.82
Cuenca 8 - Biblioteca	Ed. 28 Jesús María Fernández S.J. (Biblioteca)	6,724.0	0.77
Cuenca 9 - Pablo VI	Ed. 41 Pablo VI (Facultad de Artes)	8,243.6	0.73
	Ed. 42 Salones Facultad de Artes		
	Ed. 45 San Francisco Javier (capilla y oficinas)		
	Ed. 46 Cataluña		
Cuenca 10 - Cotidiano	Eds. 49 Auditorio Félix Restrepo	7,020.0	0.43
	Ed. 53 y Ed. 54 Jesús Emilio Ramírez S.J. (Ciencias)		
Cuenca 11 - Felix,	Ed. 50 Félix Restrepo	10,744.8	0.76
	Ed. 51 Ángel Valtierra		
	Ed. 52 Carlos Ortíz S.J.		
Cuenca 12 - Arboleda	Ed. 31 Rafael Barrientos Conto (Aulas Medicina-Morfología)	8,101.0	0.59

#### e) Escenario 5

Este escenario contempla las 9 cuencas utilizadas para el escenario anterior. Con el agua recolectada sólo se van a cubrir los usos no potables (lavado de pisos, descargas de sanitarios y riego). Este es el escenario donde la demanda de agua es media y la oferta de agua es media.

#### f) Escenario 6

El escenario 6 sólo va a suplir el uso de riego y la calidad del agua va a ser menor que la del escenario 5. Este es el escenario donde se contempla demanda de agua baja y oferta media de agua.

### 5.1.5 Estimación de los Criterios

Se evaluaron los escenarios por medio de la estimación de los indicadores promedio, mínimo y máximo de cada criterio, con el fin de obtener la matriz de posibles soluciones de cada uno de los Escenarios. Los cálculos específicos de cada criterio de cada Escenario se encuentran en el Anexo 4 - Determinación de los Criterios de los Escenarios.

#### g) Rendimiento Hidráulico

Este criterio se evaluó por medio del indicador  $IRHidra$ , el cual se determinó para cada una de las cuencas ( $i$ : 1 hasta 12), empleando el siguiente procedimiento:

Utilizando el mismo concepto del método racional expuesto anteriormente, se calculó el volumen de oferta de esorrentía ( $V_o$ ) con cada una de las alturas de las precipitaciones diarias ( $H_d$ ) de la Estación San Luis, el área ( $A_{cuenca\ i}$ ) y el coeficiente de esorrentía de cada cuenca ( $C_{cuenca\ i}$ ), ecuación 11.

$$V_o = C_{cuenca\ i} \cdot H_d \cdot A_{cuenca\ i} \quad (11)$$

El volumen de esorrentía ( $V_o$ ) se comparó con el volumen de almacenamiento máximo ( $V_{alma}$ ) de cada una de los sistemas de drenaje sostenible: cuando el  $V_o$  es mayor que ( $V_{alma}$ ) se le asigna un valor de 1 y en el caso contrario se asigna un valor de cero, al final de la evaluación se contaron el número de veces que aparecía el valor de 1 ( $n_i$ ). El rendimiento hidráulico para la cuenca  $i$  ( $IRHidra_i$ ) se determinó dividiendo el valor de  $n_i$  entre el número total de alturas de las precipitaciones diarias ( $N$ ).

Por último, el rendimiento hidráulico de cada uno de los escenarios ( $IRHidra_{Ej}$ ) se estimó empleando la ecuación 12.

$$IRHidra_{Ej} = \frac{\sum_{i=1}^{12} n_i \cdot IRHidra_i}{\sum_{i=1}^{12} \frac{n_i}{N}} \quad (12)$$

Las variaciones para determinar el indicador promedio, mínimo y máximo, se realizaron variando el coeficiente de esorrentía. Para el caso del indicador promedio, el valor de  $C_{cuenca\ i}$  es el promedio ponderado de cada cuenca (Tabla 14), para el indicador mínimo es el valor mínimo de las áreas de drenaje que conforman cada cuenca y para el caso del indicador máximo es el valor máximo de éstas, los valores de los coeficientes de esorrentía mínimo y máximo de cada cuenca están en el Anexo 3.

#### h) Eficiencia de Retención de Contaminantes

Este criterio se evaluó utilizando el indicador IRC, el cual se estimó realizando una comparación entre los parámetros de calidad definidos por el Ministerio de Salud República de Colombia (1984) y por la EU - Unión Europea (1998), los resultados de los ensayos de calidad de agua lluvia de esorrentía del

campus (Torres O., 2011) y los datos de eficiencia de retención de cada SUDS encontrados en la literatura para los tres tipos de SUDS (Jardín de Bioretención, Pavimentos Permeables, Humedales Artificiales) que conforman los escenarios planteados (CIRIA, 2004; PGCó, 2009; Kadlec *et al.*, 2009). Se escogieron los parámetros que no cumplieran alguna de las dos normas y de los que se obtuvieran datos de eficiencia de retención en la literatura.

El resultado de este ejercicio de comparación se muestra en la Tabla 15, obteniendo sólo datos de eficiencia de retención de contaminantes para los sólidos suspendidos totales (SST) y para el Plomo (Pb).

**Tabla 15.** Eficiencia de retención de contaminantes de los SUDS (Adaptado de: CIRIA, 2004; PGCó, 2009; Kadlec *et al.*, 2009)

SUDS	Parámetro	SST (%)		Pb (%)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Jardín de Bioretención			97 (promedio)	24	99
Pavimento Permeable		<b>60</b>	<b>95</b>	<b>60</b>	<b>95</b>
Humedal artificial		74	93	74	

A partir de la Tabla 15 se escogió como indicador IRC de cada escenario, los valores definidos para el pavimento permeable, siendo este sistema el más representativo en los escenarios (en efecto el SUDS pavimento permeable se propone en 7 de las 12 cuencas a intervenir) y los con valores de retención de contaminantes mínimos y máximos.

### i) Probabilidad de Falla del Sistema

Este criterio se evaluó por medio del indicador *IPFS*, el cual se determinó para cada una de las cuencas (i: 1 hasta 12), empleando el siguiente procedimiento:

Se determinó el volumen diario de oferta de escorrentía ( $V_o$ ), utilizando el mismo concepto del método racional expuesto anteriormente, empleado el año típico promedio de las alturas de las precipitaciones diarias ( $H_d$ ) de la Estación San Luis, el área ( $A_{cuenca\ i}$ ) y coeficiente de escorrentía de cada cuenca ( $C_{cuenca\ i}$ ), ecuación 13.

$$V_o = C_{cuenca\ i} \cdot H_d \cdot A_{cuenca\ i} \quad (13)$$

El  $V_o$  se fue acumulando hasta que se presentara el primer volumen de demanda diario ( $V_d\ diario$ ). Este valor se obtuvo por medio del análisis de las cuentas contrato y del inventario de usos de la universidad para cada cuenca. Cuando se presentó el primer evento de demanda se compararon los dos volúmenes y cuando el  $V_o$  fuera mayor a  $V_d\ diario$ , se acumulaba para el siguiente día con su respectivo  $V_o$ , en el caso contrario no se acumulaba. Luego se realizó la diferencia entre el  $V_o\ acumulado$  y el  $V_d\ diario$ , cuando esta diferencia fuera menor que cero, significaba que ese día específico no se tendría suministro de agua. Se contaron el número de veces que ocurría este evento y se sumaron a lo largo del año ( $n\ días\ no\ suministro$ ). Con el concepto de probabilidad descrito anteriormente, el indicador probabilidad de falla se



estimó utilizando la ecuación 14, donde  $N_{\text{días año}}$  es el número total de días en el año y  $N_{\text{SUDS } E_j}$  es número de sistemas alternativas de drenaje utilizadas en el Escenario  $j$ .

$$IPFS_{E_j} = \frac{\sum_{i=1}^{12} n_{\text{días no su ministro}}}{N_{\text{días año}} \cdot N_{\text{SUDS } E_j}} \quad (14)$$

Para la determinación de IPFS mínimo y máximo, se estimó el volumen diario de oferta de escorrentía ( $V_o$ ) con el año representativo con los valores mínimo y máximo respectivamente. Luego el proceso continua de la misma manera como se realizó para el IPFS promedio.

### j) Necesidad y Frecuencia de Operación y Mantenimiento

Este criterio se evaluó por medio del indicador *INFOM*, el cual se determinó para cada una de las cuencas ( $i$ : 1 hasta 12).

El indicador se estimó por medio de la ecuación 15 utilizando la Tabla 16, la cual resume las actividades requeridas de Operación y Mantenimiento para cada una de las técnicas alternativas de drenaje. Este indicador se divide en dos (i) Necesidad y (ii) Frecuencia; la Necesidad se determinó dividiendo el número de cuadro negros requeridos por la técnica a evaluar sobre el número total de actividades de operación y mantenimiento (12) y la Frecuencia se calculó dividiendo el número de cuadros negros requeridos del mantenimiento regular sobre el total de actividades del Mantenimiento Regular (7).

$$INFOM_{E_j} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{SUDS } E_j}} \frac{N_{i[] \text{negros}}}{12} + \sum_{i=1}^{N_{\text{SUDS } E_j}} \frac{N_{i[] \text{negros Mantenimiento Regular}}}{7}}{N_{\text{SUDS } E_j}} \quad (15)$$

Tabla 16. Aspectos claves de operación y mantenimiento de los SUDS (Adaptado de: CIRIA, 2007)

Actividad O&M	Humedales	Pavimentos Permeables	Jardines de bioretención
<b>Mantenimiento Regular</b>			
Inspección	■	■	■
Grasas/remoción de	■	■	■
Poda de pastos	■	□	■
Maleza / Control de plantas invasivas	□	□	□
Gestión de arbustos	□	□	□
Gestión de vegetación de orilla	■		
Gestión de vegetación acuática	■		
<b>Mantenimiento Ocasional</b>			
Gestión de sedimentos	■	■	■
Reemplazo de vegetación	□		□
Restauración de la permeabilidad		■	
<b>Mantenimiento correctivo</b>			
Rehabilitación de la estructura	□	□	□
Recondicionamiento de la infiltración de la superficie		□	□

Va a ser requerido ■ Puede ser requerido □



Por ejemplo, para el SUDS Pavimentos permeables, la Necesidad de Mantenimiento se determinó dividiendo el número de cuadros negros de la Tabla 16 requeridos a evaluar – cuatro para este ejemplo –, sobre el número total de actividades de operación y mantenimiento – doce actividades contempladas en Tabla 16 –. La Frecuencia de mantenimiento se calculó dividiendo el número de cuadros negros requeridos del Mantenimiento Regular de la Tabla 16 – dos para este ejemplo – sobre el total de actividades del Mantenimiento Regular – siete actividades contempladas en Tabla 16 –.

#### k) Nivel de compatibilidad con Plan Maestro

Este criterio se evaluó utilizando el indicador ICPM, para cada una de las cuencas (i: 1 hasta 12). Observando la ubicación de las alternativas (Figura 12) y comparándolas con el Plan Completo del Plan Maestro del Campus (MN&A, 2010), se determinó si cada uno de los SUDS interfería con el Plan Completo. El indicador se calcula por medio de la ecuación 16, donde  $N_{SUDS_{no}}$  son los sistemas que no interfieren con el Plan Maestro.

$$ICPM_{Ej} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{SUDS_{Ej}}} N_{SUDS_{no}}}{N_{SUDS_{Ej}}} \quad (16)$$

#### l) Impacto en Fase de Construcción vs. Cobertura

Este criterio se evaluó por medio del indicador *INFCC*, el cual se determinó para cada una de las cuencas (i: 1 hasta  $N_{SUDS_{Ej}}$ ). Este se estimó con la ecuación 17, donde  $A_{SUDS}$  es el área intervenida por el SUDS en cada cuenca (Tablas 11, 12 y 13),  $A_T$  es el área total del campus (en metros cuadrados),  $V_{o\ aa}$  es el volumen de la oferta acumulado mensual para cada cuenca y  $V_{d\ aa}$  es la demanda acumulada para cada mes (unidades en metros cúbicos).

$$IFCC_{Ej} = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_{SUDS_{Ej}}} A_{SUDS}}{A_T} \right) \frac{\sum_{i=1}^{N_{SUDS_{Ej}}} V_{o\ aa}}{\sum_{i=1}^{N_{SUDS_{Ej}}} V_{d\ aa}} \quad (17)$$

#### m) Valor Presente Neto (VPN)

Este criterio se evaluó por medio del indicador *AVPN*, utilizando el concepto de Valor Presente Neto descrito anteriormente.

La inversión inicial o presupuesto se estimó con el costo total de los SUDS, el costo de los sistemas de distribución y requerimientos de bombeo, y los costos de tratamiento del agua. El costo de los SUDS se estimó utilizando el pre-dimensionamiento realizado. Los sistemas de distribución y requerimientos de bombeo se determinaron utilizando la metodología descrita en Pérez (2005) (Cálculo de instalaciones domiciliarias), y los costos de tratamiento de agua se estimaron a partir de literatura (NEERI *et al.*,



2007) y con la cotización recibida por la División Ambiental de Ignacio Gómez IHM S.A. Estos valores se encuentran en detalle en el Anexo 3.

Los flujos netos se determinaron a partir de los costos del mantenimiento y operación anual requeridos por los SUDS y los sistemas de tratamiento, y el posible ahorro por parte del campus en el consumo de agua suministrada por el acueducto. Los costos de operación y mantenimiento anuales se estimaron a partir de la literatura (Michel S., 2003; NEERI *et al.*, 2007; Somes N. *et al.*, 2007; Interpave, 2008; CRWA, 2008; Kadlec *et al.*, 2009) (Anexo 3). El posible ahorro en el consumo de agua suministrada por el acueducto se estimó a partir del porcentaje de aprovechamiento de aguas lluvias multiplicado por el promedio anual de consumo (cuentas contrato) y el costo del metro cúbico de agua (EAAB, 2011). Adicionalmente, se utilizó como tasa de inversión la Tasa de Intervención 3.75% definida por el Banco de la República para el 2 de mayo de 2011 (Banrep, 2011).

El indicador AVPN representa el número de años mínimos requeridos para que se recupere la inversión, el cual se determinó (para cada una de las cuencas) comparando año a año el VPN con la inversión inicial y en el momento en que éste llegara a ser menor que la inversión inicial se definiría el AVPN como el año inmediatamente anterior a aquel en el que la diferencia entre el VPN y la inversión inicial fuera negativa.

Para estimar el indicador AVPN máximo y mínimo se utilizaron los costos máximo y mínimos del presupuesto (inversión inicial) y los costos de mantenimiento y operación anual mínimos y máximos (flujos netos).

#### n) Tasa Interna de Retorno del Proyecto vs. Tasa Interna de Retorno de otro Proyecto Externo

Para evaluar este criterio se utilizó el criterio IRTIR, el cual se determinó a partir del indicador AVPN para cada una de las cuencas con el concepto Tasa Interna de Retorno descrito anteriormente. Esta tasa (TIR) se dividió por el número de años (AVPN) para obtener la rentabilidad anual.

La tasa de rentabilidad anual ( $TIR_{r\text{ anual}}$ ) se comparó con una tasa de inversión externa ( $Ti_{\text{externa}}$ ) a bajo riesgo (mínima), luego con una a mediano riesgo (promedio) y otra de alto riesgo (máxima). El indicador se obtuvo por medio de la ecuación 18.

$$IRTIR_{Ej} = \frac{TIR_{r\text{ anual}}}{Ti_{\text{externa (min max prom)}}} \quad (18)$$

Se escogió como tasa de inversión externa a bajo riesgo la DTF (Depósito a Término Fijo), el cual es el promedio ponderado de las tasas de interés de los CDT de captación a 360 días ofrecidas por el sistema financiero colombiano, la DTF para los corrido del año es 3.99% (Banrep, 2011).

Como tasa de inversión externa a riesgo medio se eligió la rentabilidad anual neta de la cartera colectiva FACTORING BYR 5.28%, las inversionistas se realizan en un mercado de Inversiones Alternativas en activos para un perfil de inversionista con una moderada exposición al riesgo, donde se busca un rendimiento superior a los rendimientos en inversiones tradicionales (Bolsa y Renta, 2011).

Para la tasa de inversión externa a riesgo alto se utilizó la rentabilidad anual del último año del IGBC (14.96%) (Índice General de la Bolsa de Valores de Colombia), el cual corresponde al indicador bursátil del mercado de acciones, refleja el comportamiento promedio de los precios de las acciones en el mercado, ocasionado por la interacción de las fluctuaciones que por efecto de oferta y demanda sufren los precios de las acciones (BVC, 2011).

## 5.2 RESULTADOS OBTENIDOS

Los datos empleados para ejecutar la herramienta se describen a continuación. En las Tablas 17a, 17b y 17c se muestran las Matrices de las Posibles Soluciones promedio, mínima y máxima respectivamente de la evaluación de cada escenario ( $E_i$ ) respecto a los criterios. Las unidades de los criterios se expresan en fracciones excepto para el criterio 7 el cual se expresa en número de años.

**Tabla 17.** Matrices de Posibles Soluciones, evaluación de cada de los 6 Escenario ( $E_i$ ) respecto a cada criterio, unidades expresadas en fracciones excepto para el criterio 7 el cual se expresa en años (Fuente: elaboración propia)

### a. Matriz de Posibles Soluciones Promedio

Criterios / Escenario	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1 IRHidra	0.32	0.32	0.32	0.35	0.35	0.35
2 IRC	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
3 IPFS	0.26	0.11	0.00	0.19	0.04	0.00
4 INFOM	1.70	1.70	1.70	1.07	1.07	1.07
5 ICPM	0.42	0.42	0.42	0.33	0.33	0.33
6 IFCC	0.80	1.34	4.27	1.12	2.31	6.10
7 IAVPN	5.00	8.00	10.00	7.00	5.00	6.00
8 IRTIR	1.48	0.64	0.40	0.27	1.54	1.01

### b. Matriz de Posibles Soluciones Mínima

Criterios / Escenario	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1 IRHidra	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.19
2 IRC	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
3 IPFS	1.00	1.00	0.93	1.00	1.00	0.90
4 INFOM	1.70	1.70	1.70	1.07	1.07	1.07
5 ICPM	0.00	0.42	0.42	0.33	0.33	0.33
6 IFCC	0.80	0.35	1.26	1.12	2.31	6.10
7 IAVPN	5.00	7.00	10.00	6.00	5.00	6.00
8 IRTIR	1.28	1.00	0.54	1.37	1.70	1.35

### c. Matriz de Posibles Soluciones Máxima

Criterios / Escenario	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1 IRHidra	0.32	0.32	0.32	0.35	0.35	0.35
2 IRC	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
3 IPFS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4 INFOM	1.70	1.70	1.70	1.07	1.07	1.07
5 ICPM	0.00	0.42	0.42	0.33	0.33	0.33
6 IFCC	1.44	2.32	6.79	1.95	3.71	8.67
7 IAVPN	6.00	8.00	10.00	7.00	5.00	6.00
8 IRTIR	0.43	0.20	0.14	0.27	0.50	0.35

Los criterios que presentan los mismos valores (4 -INFOM y 5- ICPM) en todas las matrices no varían porque son constantes, dependen del número de SUDS en cada Escenario. El criterio 1 IRHidra utiliza



los mismos valores para la matriz máxima y promedio porque la variación es baja y no se alcanza a notar la diferencia.

Para los criterios de evaluación es necesario definir los sentidos de preferencia y las distribuciones de probabilidad de los criterios (Tabla 18). Los sentidos de preferencia definen el comportamiento de los valores que puede llegar a tomar un criterio. En el caso que el aumento en el valor del criterio sea es beneficioso el sentido de preferencia es 1, y para el caso contrario es -1. Por ejemplo para el criterio 1 (Rendimiento hidráulico – IRHidra) con un sentido de preferencia -1, si su valor aumenta indica que el escenario tiene un rendimiento menor comparado con otro, en cambio para el criterio 5 (Contribución a las políticas de desarrollo del campus – ICPM) con un sentido de preferencia 1, si su valor aumenta indica que el escenario contribuye a las políticas de desarrollo del campus.

**Tabla 18.** Distribución y sentido de preferencia de los criterios (Fuente: elaboración propia)

	<b>Criterios de Evaluación</b>	<b>Sentidos de preferencia *</b>	<b>Distribución **</b>
1	Rendimiento hidráulico - IRHidra	-1	1
2	Eficiencia de retención de contaminantes - IRC	1	2
3	Probabilidad de falla del sistema - IPFS	-1	1
4	Necesidad y frecuencia de operación y mantenimiento - INFOM	-1	2
5	Contribución a las políticas de desarrollo del campus - ICPM	1	2
6	Impacto en fase de construcción Vs. Cobertura - IFCC	1	1
7	Valor Presente Neto (VPN) - IAVPN	-1	1
8	Tasa Interna de Retorno Vs. Tasa Inversión Externa - IRTIR	1	1

\*1 entre mayor calificación tenga la solución es mejor, -1 entre mayor calificación tenga la solución es peor

\*\* 1 para Distribución Normal y 2 para Distribución Uniforme

Las distribuciones de probabilidad establecen la aleatoriedad de cada criterio. Éstas se definieron teniendo en cuenta la construcción de cada criterio y sus variables, se emplea una la distribución no uniforme cuando los valores extremos son poco frecuentes. Por ejemplo el criterio 3 (Probabilidad de falla del sistema – IPFS) depende de los datos de precipitaciones, los cuales se pueden caracterizar mejor con una distribución normal. En cambio el criterio 5 (Contribución a las políticas de desarrollo del campus – ICPM) dependen del número de SUDS que contribuyen con las políticas de desarrollo del campus, por lo tanto el distribución de probabilidad que representa mejor este caso es la uniforme.

Adicionalmente, se obtuvieron los pesos promedio, mínimo y máximo de los criterios por medio de una encuesta realizada al personal de la Dirección de Recursos Físicos de la Universidad Lina Marcela Achury Uribe, Javier Forero Torres, Pebles Fragozo Rodelo y Juan Pablo Vargas Triana, y se consultaron a ingenieros externos y expertos en el tema: Carlos Alfonso Devia Castillo, Jaime Andrés Lara Borrero, Sandra Méndez Fajardo, Alejandra Ruiz López y David Andrés Zamora Ávila. Los pesos se muestran en la Tabla 19, junto a éstos está su distribución de probabilidad la cual se definió uniforme.

Para los umbrales de discordancia se eligieron los siguientes niveles aceptables teniendo en cuenta que

$$c_{min,1} \geq c_{min,2} \geq c_{min,3} \geq 0 :$$

$$c_{min,1}=0.7$$



$$C_{min,2}=0.6$$

$$C_{min,3}=0.55$$

Tabla 19. Pesos de los Criterios (Fuente: elaboración propia)

	1 IRHidra	2 IRC	3 IPFS	4 INFOM	5 ICPM	6 IFCC	7 IAVPN	8 IRTIR
<b>Participante 1</b>	16%	16%	3%	3%	16%	16%	16%	16%
<b>Participante 2</b>	25%	5%	5%	25%	25%	5%	5%	5%
<b>Participante 3</b>	12%	12%	12%	4%	4%	19%	19%	19%
<b>Participante 4</b>	3%	10%	17%	10%	17%	10%	17%	17%
<b>Participante 5</b>	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%	13%
<b>Participante 6</b>	36%	21%	7%	7%	7%	7%	7%	7%
<b>Participante 7</b>	16%	20%	20%	12%	12%	8%	8%	4%
<b>Participante 8</b>	18%	18%	18%	18%	11%	4%	4%	11%
<b>Participante 9</b>	14%	23%	14%	23%	14%	5%	5%	5%
<b>Pesos Promedio</b>	17%	15%	12%	13%	13%	10%	10%	11%
<b>Pesos Mínimo</b>	3%	5%	3%	3%	4%	4%	4%	4%
<b>Pesos Máximo</b>	36%	23%	20%	25%	25%	19%	19%	19%
<b>Distri. Peso</b>	2	2	2	2	2	2	2	2

A continuación se presentarán los resultados siguiendo una metodología para observar la variabilidad de los puestos, qué tanta influencia tiene cada elemento sobre la decisión, cómo se puede guiar un proceso de levantamiento de información y a quién está dirigida la encuesta. La primera parte inicia con: (i) los datos promedios de la matriz de posibles soluciones, los pesos de los criterios y los umbrales de concordancia definidos, (ii) luego la variabilidad se va incrementando, comenzando sólo con la aleatoriedad en la matriz de posibles soluciones, (iii) seguido por la variación de los pesos de los criterios, (iv) se varían de los umbrales de concordancia y (v) se finaliza teniendo en cuenta todas las variaciones posibles (matriz, pesos y umbrales).

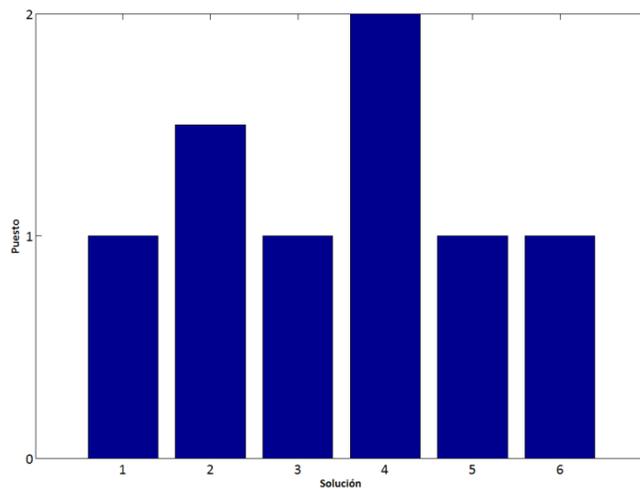
La segunda parte evalúa la influencia de cada uno de los pesos definidos por los participantes, tanto a nivel individual como por grupos. Adicionalmente, se debe establecer qué sucede si se generan participantes virtuales a partir de las encuestas base como si fueran representativos, para determinar si es necesario tener más encuestas y cuáles deben ser los grupos a encuestar.

La tercera y última parte inicia evaluando qué tan importante es determinado criterio para definir el resultado, lo que nos da una idea de qué tan robusta es la herramienta. A partir de lo anterior se observa si se tienen criterios redundantes. Además para determinar qué tan necesario es tener variabilidad en los pesos, se evaluó que tan sensible es la herramienta al manejar el peso promedio en alguno de los criterios.

### 5.2.1 CRIDE – Opción 0

Ejecutando la rutina CRIDE con la matriz promedio y los pesos promedio, la clasificación de las alternativas se muestra en la Figura 25.

De acuerdo a los resultados presentados en la Figura 25, los Escenarios 1, 5 y 6 quedaron empatados ocupando el primer puesto, el Escenario 2 ocupó el puesto 2 y el Escenario 3 obtuvo el último puesto.



Puesto	Escenarios
1	E1
1	E3
1	E5
1	E6
2	E2
3	E4

Figura 25. Resultados con la rutina CRIDE – Opción 0 (Fuente: elaboración propia)

A partir de este resultado es posible recomendar que los escenarios más deseables por el grupo de encuestados son el 1 (escenario donde la demanda y la oferta de agua son más altas y los requerimientos de calidad de agua son los más elevados), 3 (escenario donde se contempla demanda de agua baja y oferta de agua alta, y los requerimientos de calidad de agua son bajos), 5 (escenario donde la demanda de agua es media y la oferta de agua es media y los requerimientos de calidad de agua son medios) y el 6 (escenario donde se contempla demanda de agua baja y oferta de agua media y los requerimientos de calidad de agua son bajos). Adicionalmente, se puede decir que el Escenario 4 (escenario donde la demanda de agua es media y la oferta de agua es media y los requerimientos de calidad de agua son los más elevados) es el escenario menos deseable.

## 5.2.2 CRIDE – Opción 1

A pesar de que el resultado presentado en 5.2.1 da una buena idea para la selección de las alternativas, se presentaron empates entre las alternativas, por lo cual se decidió contemplar la variabilidad de los criterios realizando la aleatoriedad entre los valores mínimos y máximos de éstos.

Para determinar el número de simulaciones mínimas del programa se acumuló la frecuencia de la posición de cada alternativa a lo largo de 10.000 simulaciones y se graficaron (Figura 21). Se observó que en la número 6000 todas las alternativas se estabilizaban, es decir tienden a ocupar el mismo puesto. Los resultados obtenidos con cada una de las variaciones se compararon con la Ejecución de referencia (Ejecución con la mayor variación, matriz, pesos y umbrales aleatorios, presentado en detalle en la sección 4.2.5).

Ejecutado la rutina CRIDE – Opción 1 variando sólo la Matriz de Posibles Soluciones entre los valores mínimo y máximo presentados en la Tabla 17b y Tabla 17c, de acuerdo a con las distribuciones indicadas en la Tabla 18 y con los pesos promedio, los resultados se muestran en las Figuras 27 y 28 para las 6000 simulaciones.

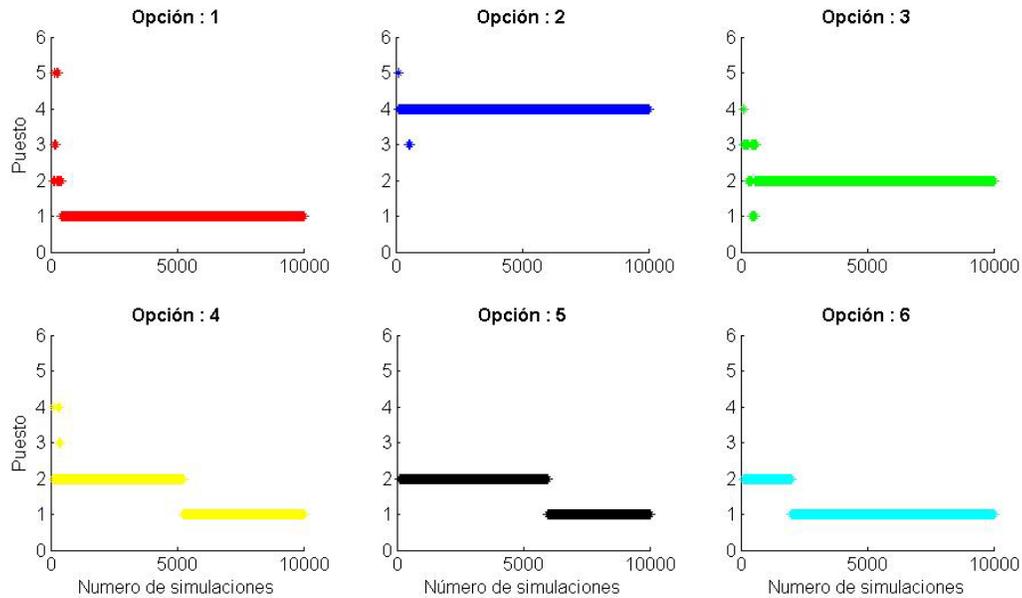
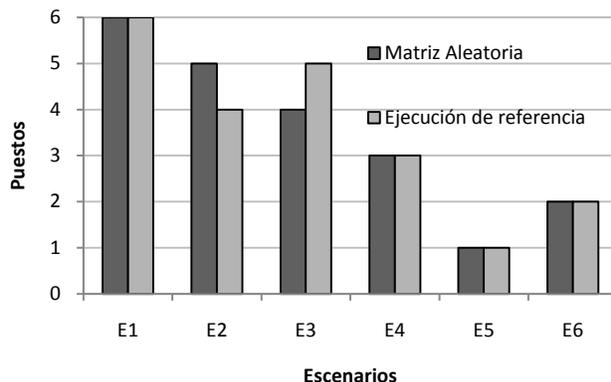


Figura 26. Puesto más frecuente de cada Escenario (Opción) vs Número de simulaciones (Fuente: elaboración propia)

En la Figura 27 se puede observar el puesto que ocupó cada Escenario y en la tabla adjunta se indica la probabilidad de cada Escenario en ocupar determinado puesto. El escenario que ocupó el primer puesto es el Escenario 5 con una la probabilidad de 65.50%. Con una probabilidad de 56.52% de obtener el primer puesto, el Escenario 6 ocupó el segundo puesto. En cambio, la solución que ocupó el último puesto fue el Escenario 1 con la probabilidad más baja de obtener el segundo puesto (5.02%), quedando los Escenarios 2 y 3 por encima de éste. Comparando estos resultado con la Ejecución de referencia (presentado en detalle en la sección 5.2.6), se puede observar que se presentaron diferencias entre los Escenarios 2 y 3.



P\S	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	5.02%	15.23%	15.95%	39.22%	65.50%	56.52%
2	46.42%	50.28%	48.57%	38.43%	26.10%	33.70%
3	38.57%	26.35%	27.90%	17.10%	6.72%	8.22%
4	8.52%	7.25%	7.00%	4.70%	1.50%	1.42%
5	1.37%	0.83%	0.58%	0.55%	0.18%	0.13%
6	0.12%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%

P\S: Puesto \ Solución

Figura 27. Resultados con la rutina CRIDE – Opción 1 Matriz de Posibles Soluciones aleatoria para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

La probabilidad que obtuvo cada escenario en cada puesto se ilustra en la Figura 28. Se observa que los Escenarios 2 y 3 obtuvieron probabilidades similares y para la mayoría de los escenarios la probabilidad de obtener los últimos puestos (5 y 6) es baja.

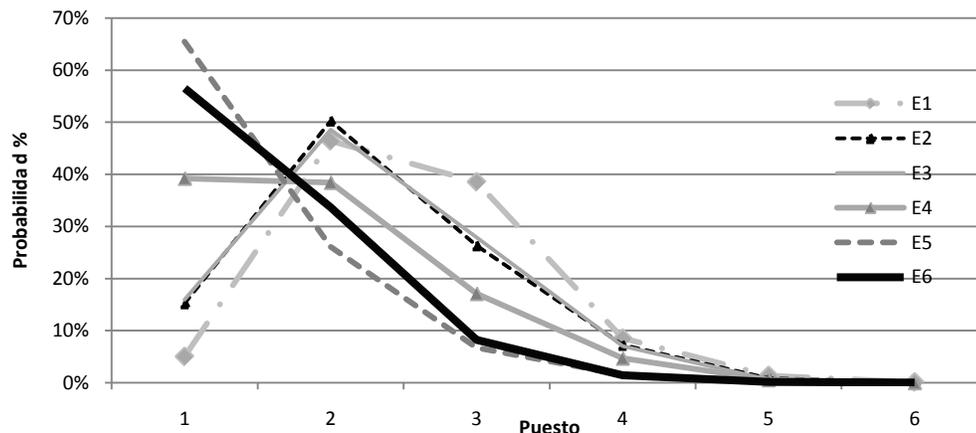


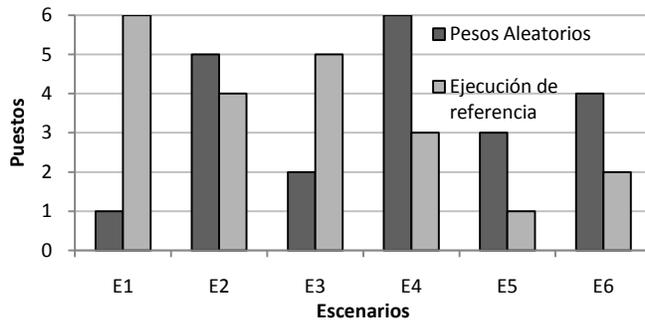
Figura 28. Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz de Posibles Soluciones aleatoria (Fuente: elaboración propia)

Con los resultados obtenidos variando la matriz de soluciones es posible recomendar que el escenario más deseable por el grupo de encuestados es el 5 (escenario donde la demanda de agua es media y la oferta de agua es media y los requerimientos de calidad de agua son medios). Adicionalmente, se puede decir que el Escenario 1 (escenario donde la demanda y la oferta de agua son más altas y los requerimientos de calidad de agua son los más elevados) es el escenario menos deseable.

### 5.2.3 CRIDE – Opción 2

Ejecutado la rutina CRIDE – Opción 2 variando sólo los pesos de los criterios con los valores mínimos y máximos (Tabla 18) y con la matriz de posibles soluciones promedio (Tabla 17a), los resultados se muestran en las Figuras 29 y 30, para 6000 simulaciones.

En la Figura 29 se puede observar el puesto que ocupó cada Escenario y en la tabla adjunta se indica la probabilidad de cada Escenario en ocupar determinado puesto. De acuerdo a lo anterior se puede observar que el Escenario 1 ocupó el primer puesto, con una probabilidad del 62.13%. El Escenario 3 (el que ocupó el segundo puesto) su probabilidad de obtener el primer puesto fue de 61.08%. En cambio, la solución que ocupó el último puesto fue el Escenario 4 con la probabilidad de ocupar el primer puesto más baja (0.38%) en comparación con los Escenarios 2 y 6. Los resultados obtenidos en esta ejecución comparados con la ejecución de referencia presentan diferencias en todos los puestos.



P\S	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	62.13%	42.92%	61.08%	0.38%	51.93%	51.47%
2	14.25%	9.27%	21.52%	45.12%	30.50%	31.87%
3	10.98%	13.37%	8.10%	6.97%	10.85%	9.43%
4	8.47%	20.53%	9.18%	13.28%	6.72%	7.23%
5	1.17%	13.92%	0.12%	20.22%	0.00%	0.00%
6	3.00%	0.00%	0.00%	14.03%	0.00%	0.00%

P\S: Puesto \ Solución

Figura 29. Resultados con la rutina CRIDE, Pesos aleatorios para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

La probabilidad que obtuvo cada escenario en cada puesto se ilustra en la Figura 30, se puede notar que los Escenarios 5 y 6 presentaron probabilidades cercanas en todos los puestos lo mismo sucede con los Escenarios 1 y 3.

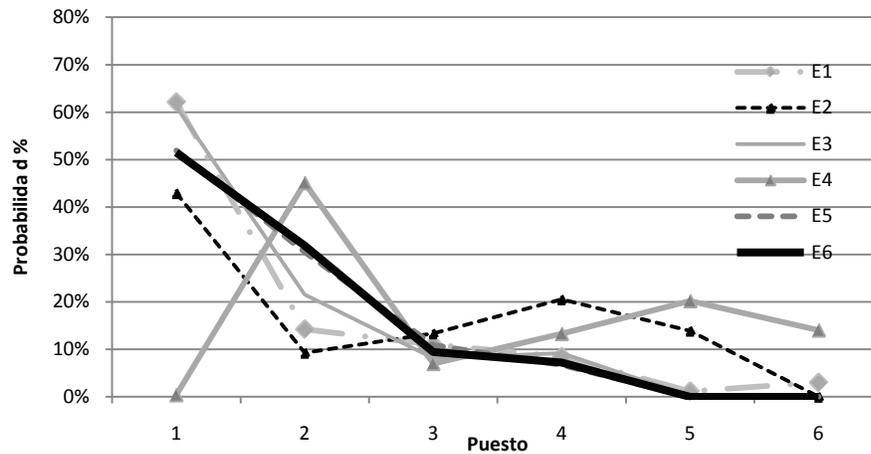


Figura 30. Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Pesos aleatorios (Fuente: elaboración propia)

A partir de los resultados obtenidos variando sólo los pesos de los criterio es posible recomendar que el escenario más deseables por el grupo de encuestados es el 1 (escenario donde la demanda y la oferta de agua son más altas y los requerimientos de calidad de agua son los más elevados). Adicionalmente, se puede decir que el Escenario 4 (escenario donde la demanda de agua es media y la oferta de agua es media y los requerimientos de calidad de agua son los más elevados) es el escenario menos deseable.

### 5.2.4 CRIDE – Opción 3

Ejecutado la rutina CRIDE con la Matriz de Posibles Soluciones (Tabla 17b y Tabla 17c) y los Pesos de los Criterios aleatorios (Tabla 19), los resultados se muestran en la Figura 31 y 32 para 6000 simulaciones.

En la Figura 31 se puede observar el puesto que ocupó cada Escenario y en la tabla adjunta se indica la probabilidad de cada Escenario en ocupar determinado puesto. El Escenario ganador fue el 5 con una probabilidad en el primer puesto de 60.82%, lo sigue el Escenario 6 con probabilidad de 55.42%, obteniendo el segundo puesto. El Escenario 1 quedó de último lugar con la probabilidad más baja (5.82%) en obtener el primer puesto comparado con los Escenarios 2 y 3. Esta ejecución difiere en los puestos de los Escenarios 3 y 4 en comparación con la ejecución de referencia.

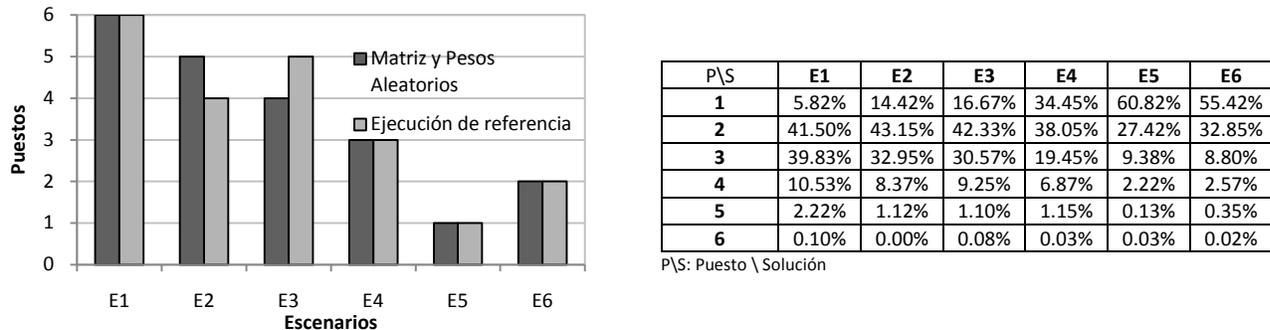


Figura 31. Resultados con la rutina CRIDE – Opción 3, Matriz de Posibles Soluciones y Pesos aleatorios para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

La probabilidad que obtuvo cada escenario en cada puesto se ilustra en la Figura 32, en el puesto 2 los Escenarios 2 y 3 obtuvieron probabilidades similares (E4: 43.15%, E5: 42.33%). Los Escenarios 5 y 6 presentaron probabilidades cercanas en todos los puestos.

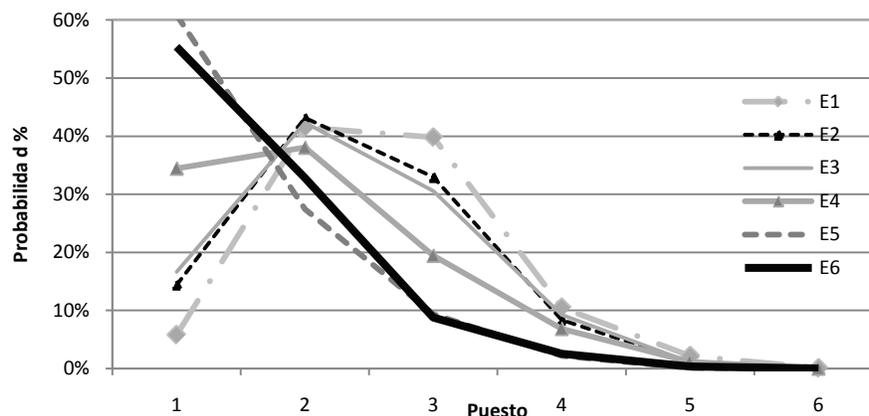


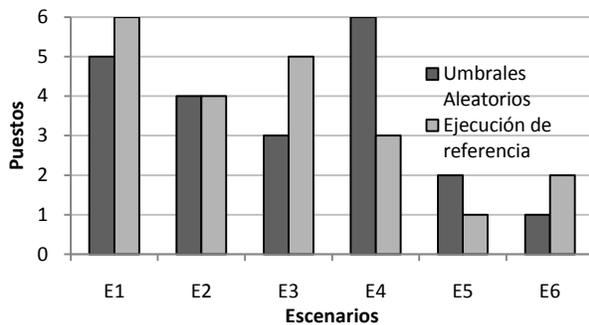
Figura 32. Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz de Posibles Soluciones y Pesos aleatorios (Fuente: elaboración propia)

Con los resultados obtenidos variando la matriz de soluciones es posible recomendar que el escenario más deseable por el grupo de encuestados es el 5 (escenario donde la demanda de agua es media y la oferta de agua es media y los requerimientos de calidad de agua son medios). Adicionalmente, se puede decir que el Escenario 1 (escenario donde la demanda y la oferta de agua son más altas y los requerimientos de calidad de agua son los más elevados) es el escenario menos deseable.

### 5.2.5 CRIDE – Opción 4

Se efectuó la ejecución de la rutina CRIDE – Opción 4 con los Umbrales de Concordancia aleatorios, la Matriz de Posibles Soluciones (Tabla 17a) y los Pesos de los Criterios con los valores promedio (Tabla 19b), los resultados se muestran en las Figuras 33 y 34.

En la Figura 33 se puede observar el puesto que ocupó cada Escenario y en la tabla adjunta se indica la probabilidad de cada Escenario en ocupar determinado puesto. En esta ejecución el Escenario ganador es el 6 con un probabilidad de 86.90%, la solución que obtuvo el segundo puesto fue el Escenario 5 (probabilidad 85.20% de obtener el primer puesto). Se puede apreciar en la Figura 33 que estos dos Escenarios (5 y 6) sus probabilidades estuvieron muy cercanas, lo mismo sucede con los Escenarios 2 y 3, ocupando el tercer lugar el Escenario 3 y en cuarto el 2. En el último lugar quedó para el Escenario 4 con la probabilidad más baja en el primer puesto (1.62% de probabilidad). En comparación con la ejecución de referencia sólo el Escenario 2 permaneció en su lugar.



P\S	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	61.13%	69.25%	70.42%	1.62%	81.20%	86.90%
2	30.82%	25.87%	29.53%	68.25%	14.23%	13.10%
3	4.80%	1.68%	0.05%	25.62%	4.57%	0.00%
4	3.25%	3.20%	0.00%	1.27%	0.00%	0.00%
5	0.00%	0.00%	0.00%	3.25%	0.00%	0.00%
6	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

P\S: Puesto \ Solución

Figura 33. Resultados con la rutina CRIDE – Opción 4, Umbrales de Concordancia aleatorios, Matriz de Posibles Soluciones y Pesos promedio para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

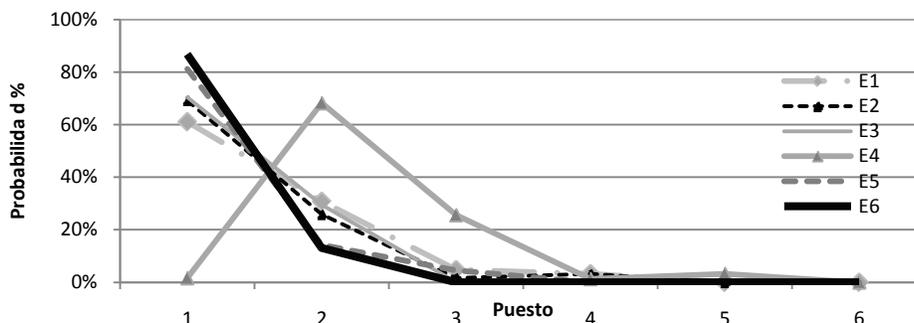


Figura 34. Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz de Posibles Soluciones y Pesos aleatorios (Fuente: elaboración propia)

Con los resultados obtenidos variando los umbrales de concordancia es posible recomendar que el escenario más deseable por el grupo de encuestados es el 6 (escenario donde se contempla demanda de agua baja y oferta de agua media y los requerimientos de calidad de agua son bajos). Adicionalmente, se puede decir que el Escenario 4 (escenario donde la demanda de agua es media y la oferta de agua es media y los requerimientos de calidad de agua son los más elevados) es el escenario menos deseable.

### 5.2.6 CRIDE – Opción 5

Contemplando todas las variaciones en la Matriz de Posibles Soluciones (Tabla 17b y Tabla 17c), los Pesos de los Criterios (Tabla 19), y los Umbrales de Concordancia, se realizó la ejecución de la rutina CRIDE – Opción 5. Esta ejecución se considera la de referencia porque contempla toda la variabilidad de los datos de entrada. Los resultados se muestran en las Figuras 35 y 36.

En la Figura 35 se puede observar el puesto que ocupó cada Escenario y en la tabla adjunta se indica la probabilidad de cada Escenario en ocupar determinado puesto. El Escenario ganador fue el 5 con una probabilidad de 69.70%. El segundo puesto lo ocupó el Escenario 6 con una probabilidad de 62.73%, lo sigue el Escenario 4 con probabilidad de 41.20%, obteniendo el tercer puesto. El Escenario 1 quedó de último lugar con la probabilidad más baja en obtener el primer puesto (14.55%) comparado con los Escenarios 2 y 3. Los Escenarios 1,2 y3 obtuvieron comportamientos similares en los puestos (Figura 36).

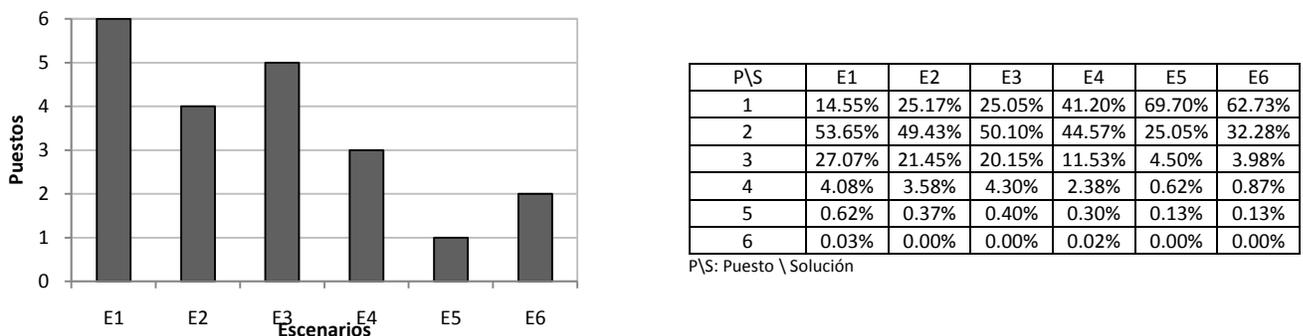


Figura 35. Resultados con la rutina CRIDE – Opción 5, Matriz de Posibles Soluciones, Pesos y Umbrales de Concordancia aleatorios para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

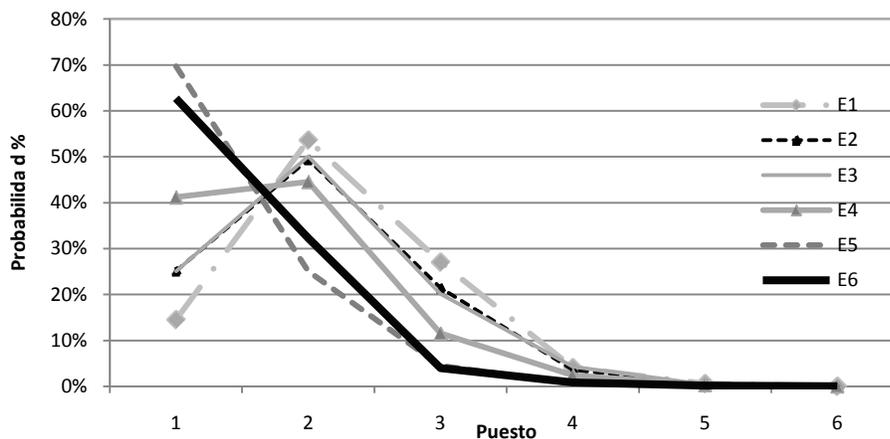


Figura 36 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz de Posibles Soluciones, Pesos y Umbrales de Concordancia aleatorios para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

En la Tabla 20 se resumen los resultados en cada una de las ejecuciones realizadas con las opciones de CRIDE.



Tabla 20. Resumen de las posiciones de los escenarios en cada opción de CRIDE (Fuente: elaboración propia)

	<b>OPCIÓN 0</b> Matriz y Pesos sin Aleatoriedad (ELECTRE II)	<b>OPCIÓN 1</b> MATRIZ Aleatoria	<b>OPCIÓN 2</b> PESOS Aleatorios	<b>OPCIÓN 3</b> MATRIZ Y PESOS Aleatorios	<b>OPCIÓN 4</b> UMBRALES Aleatorios	<b>OPCIÓN 5</b> MATRIZ, PESOS UMBRALES Aleatorios
<b>E1</b>	1	6	1	6	5	6
<b>E2</b>	2	5	5	5	4	4
<b>E3</b>	1	4	2	4	3	5
<b>E4</b>	3	3	6	3	6	3
<b>E5</b>	1	1	3	1	2	1
<b>E6</b>	1	2	4	2	1	2

En síntesis los primeros puestos fueron ocupados por los Escenarios 4, 5, y 6, el mejor Escenario es el quinto, porque en la mayoría de la variaciones, excepto en las Opciones 2 y 4, este Escenario obtuvo el primer puesto. Lo anterior se debe a que los Umbrales definen qué tan exigente es el decisor comparando las alternativas, por lo tanto ese primer puesto puede ser ocupado por cualquiera de los Escenarios 5 y 6.

### 5.2.7 CRIDE: Pesos definidos por los Encuestados

Con el objetivo de conocer los escenarios que escogería una sola persona, se realizó la ejecución de la rutina CRIDE con cada uno de los pesos de los criterios definidos por las personas encuestadas, sin aleatoriedad y luego con aleatoriedad con 6000 simulaciones.

Para observar las decisiones en grupo se obtuvo las calificaciones de los Escenarios si un grupo hubiera elegido ((i) Recursos Físicos y (ii) Expertos externos.

Adicionalmente, se determinó el número necesario de encuestas para obtener el mismo resultado y así poder observar la variabilidad de las opiniones de los encuestados. Se crearon grupos virtuales a partir de los participantes virtuales (construidos con los datos suministrados por los nueve participantes de la encuesta).

A continuación se presentan los resultados.

#### a) Pesos de los Criterios Definidos por los Encuestados sin Aleatoriedad

Ejecutando la rutina CRIDE – Opción 0 con la Matriz de Posibles Soluciones promedio, los Umbrales definidos inicialmente y los pesos de los criterios definidos por cada uno de los encuestados, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 37.

Para el Escenario 1 cuatro de los nueve participantes estuvieron de acuerdo en que ocupara el primer puesto y para el segundo puesto dos participantes coincidieron. Para dos participantes el Escenario 2 ocupó el primer puesto, para tres el cuarto puesto y para dos participantes el quinto puesto. Para el Escenario 3 seis participantes de los nueve estuvieron de acuerdo en que el ocupara el primer puesto. Tres de los nueve participantes estuvo de acuerdo con que el Escenario 4 ocupara el último puesto y el Escenario 5 ocupara el primer puesto. Para el Escenario 6 cinco de nueve participantes coincidieron en que ocupara el segundo puesto.

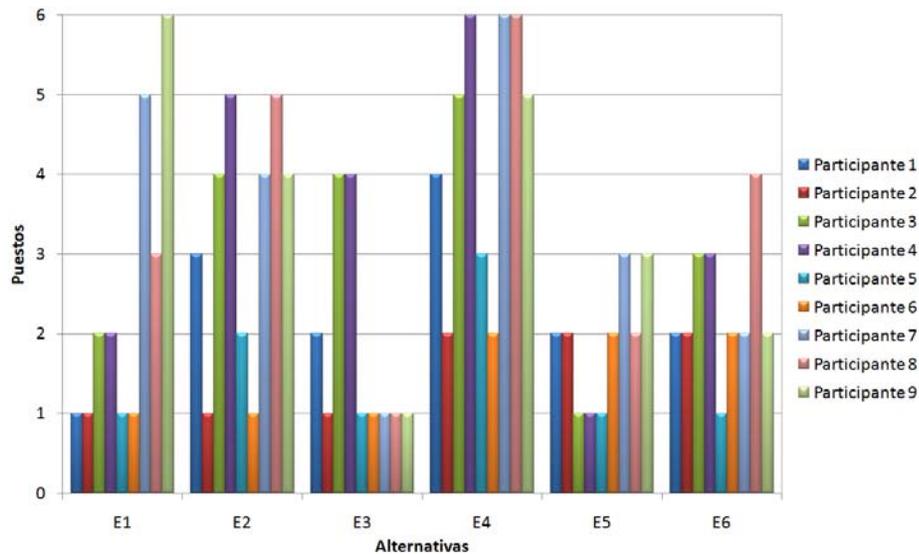


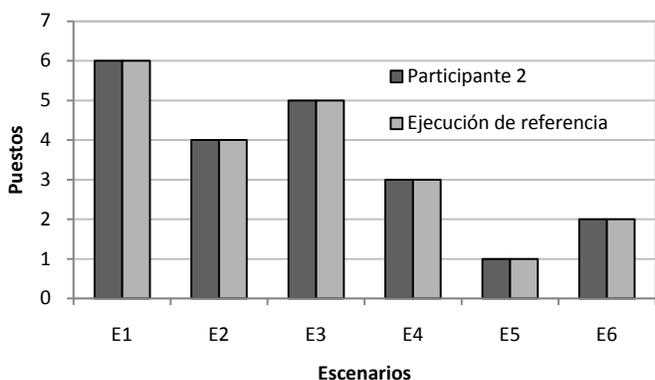
Figura 37. Resultados con la rutina CRIDE, Pesos de los encuestados (Fuente: elaboración propia)

**b) Matriz de Posibles Soluciones y Umbrales Aleatorios, Pesos de los Criterios Definidos por los Encuestados**

Ejecutando la rutina CRIDE – Opción 5 con los Pesos de los Criterios de cada uno de los participantes, con la Matriz de Posibles Soluciones y los Umbrales aleatorios los resultados se muestran en las Figuras 38 hasta la 55.

De acuerdo al Participante 1, el Escenario ganador fue el quinto (Figura 38), con una probabilidad de 79.62%. El segundo puesto lo ocupó el Escenario 6 con una probabilidad de 68.77%, en los últimos puestos quedaron los Escenarios 2, 3 y 1. Comparando estos resultados con la ejecución de referencia, no se presentaron diferencias.

Las probabilidades de los Escenarios 3 y 2 tienen comportamientos similares en cada puesto (Figura 39).



P\S	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	19.00%	30.63%	30.17%	38.30%	79.62%	68.77%
2	55.28%	47.68%	47.72%	44.83%	16.82%	27.28%
3	20.90%	17.25%	17.62%	12.98%	2.80%	3.32%
4	3.83%	3.95%	4.05%	3.27%	0.75%	0.58%
5	0.93%	0.45%	0.45%	0.60%	0.02%	0.03%
6	0.05%	0.03%	0.00%	0.02%	0.00%	0.02%

P\S: Puesto \ Solución

Figura 38. Resultados con la rutina CRIDE-, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 1, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

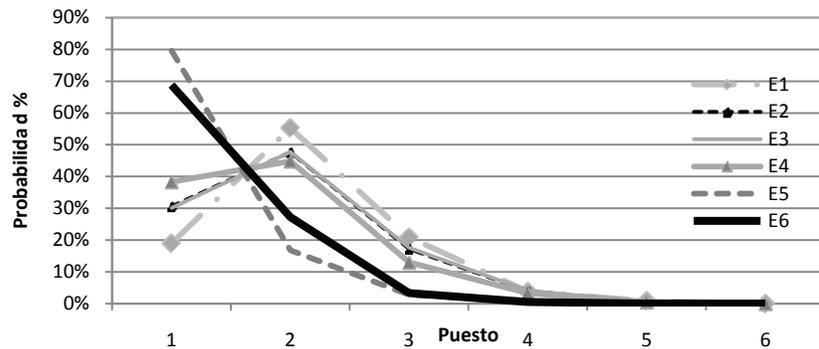
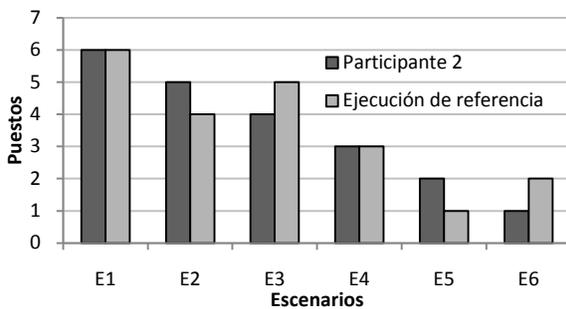


Figura 39 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el Participante 1, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

Para el participante 2 el Escenario 6 fue el ganador (Figura 40), con una probabilidad de 57.90%, seguido por el Escenario 5 con una probabilidad de 57.58%. Esta ejecución coincide con la de referencia en los puestos de los Escenarios 1 y 4.



P\S	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	9.70%	28.75%	30.98%	48.75%	57.58%	57.90%
2	47.18%	54.48%	52.95%	41.00%	37.32%	36.67%
3	35.25%	14.98%	14.18%	9.05%	4.58%	4.90%
4	6.75%	1.68%	1.83%	1.05%	0.52%	0.50%
5	1.03%	0.10%	0.05%	0.15%	0.00%	0.03%
6	0.08%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

P\S: Puesto \ Solución

Figura 40. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el Participante 2, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

A nivel general las probabilidades son muy cercanas en cada puesto (Figura 41), los Escenarios 5 y 6 presentaron un comportamiento similar, lo mismo sucede con las alternativas 2 y 3.

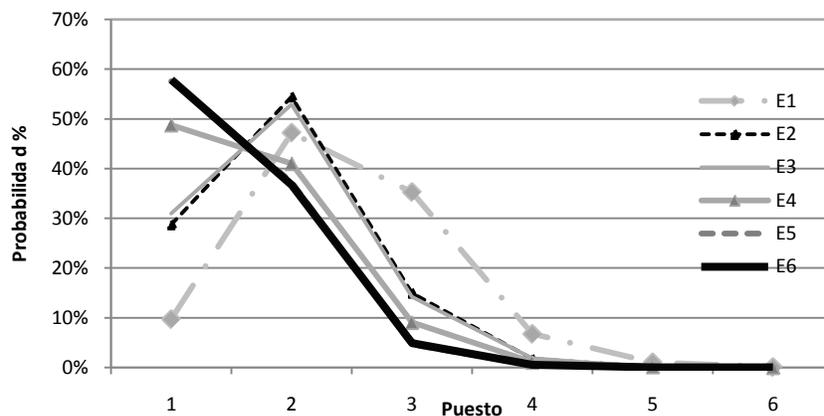


Figura 41 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el Participante 2, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

De acuerdo al Participante 3 la mejor solución es el Escenario 5 (Figura 42), con una probabilidad del 87.67%, el segundo puesto lo ocupó el Escenario 5 con una probabilidad de 73.38%. El Escenario que obtuvo el último puesto fue el segundo, con la probabilidad más baja de ocupar el primer puesto (7.87%). Comparando esta ejecución con la de referencia se observan diferencias en los puestos de los Escenarios 1 y 2.

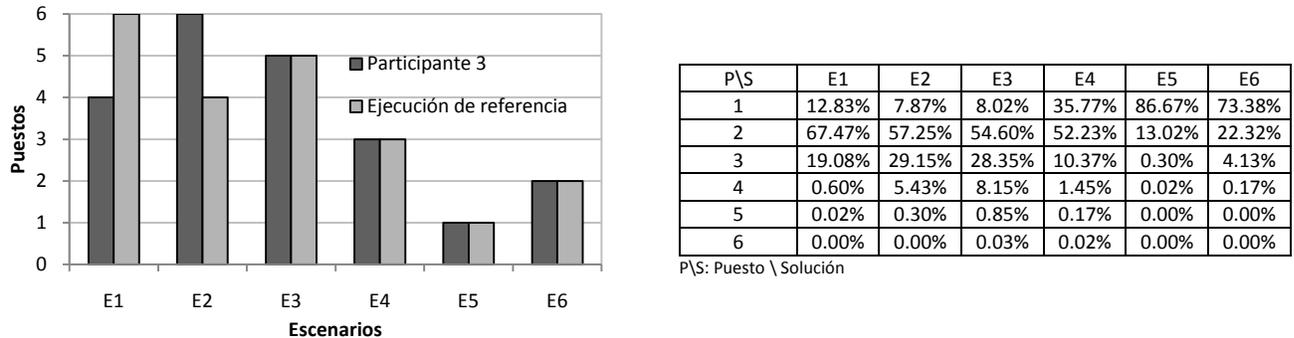


Figura 42. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 3, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

Los Escenarios 1, 2 y 3 obtuvieron comportamientos similares en los puestos con probabilidades cercanas (Figura 43). Lo mismo sucede con el Escenario 4 y 5.

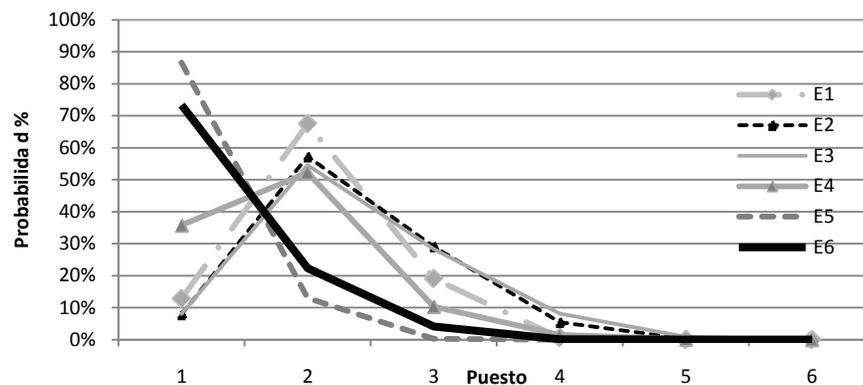
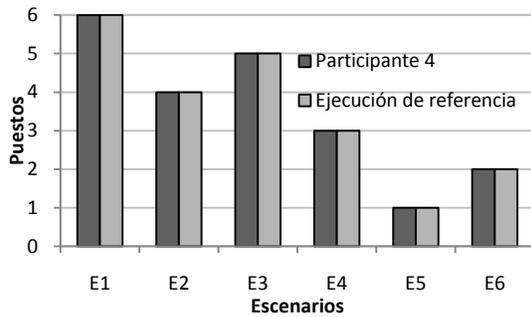


Figura 43 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el Participante 3, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

Para el caso del participante 4 la mejor solución fue el Escenario 5 (Figura 44), con una probabilidad de obtener el primer puesto de 84.67%, el segundo puesto lo ocupó el Escenario 6 con una probabilidad de 64.98%. La peor solución es el Escenario 1, con la probabilidad más baja de obtener el primer puesto (10.20%). Comparando estos resultados con los de referencia no se observaron diferencias.



P\S	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	10.20%	21.62%	15.83%	39.87%	84.67%	64.98%
2	58.65%	51.55%	48.60%	51.58%	14.73%	32.98%
3	29.18%	24.10%	28.02%	7.50%	0.57%	1.77%
4	1.77%	2.55%	6.97%	0.95%	0.03%	0.27%
5	0.20%	0.18%	0.57%	0.10%	0.00%	0.00%
6	0.00%	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%

P\S: Puesto \ Solución

Figura 44. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 4, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

Los Escenarios 2 y 3 obtuvieron probabilidades cercanas en cada uno de los puestos, esto se puede observar en la Figura 45. Los Escenarios 5 y 6 presentaron grandes diferencias en las probabilidades de obtener los primeros dos puestos.

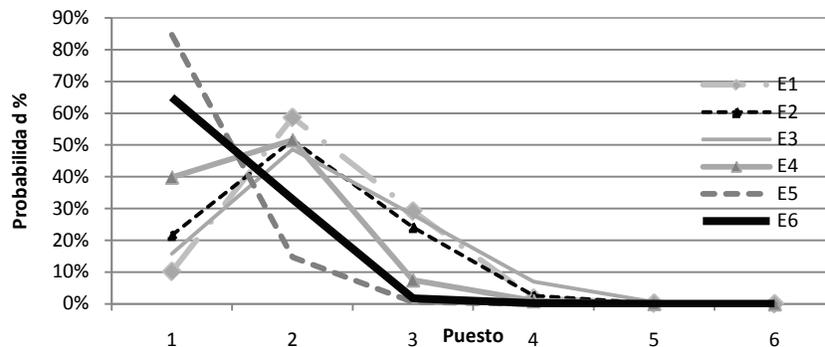
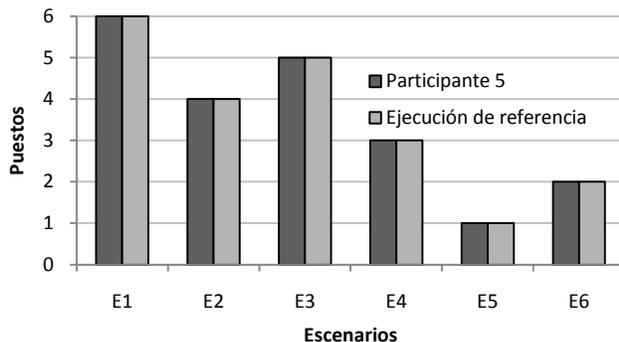


Figura 45 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 4, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

El Escenario 6 fue elegido como el ganador, de acuerdo a los pesos de los criterios definidos por el Participante 5, con una probabilidad de 81.07% (Figura 46). En el segundo puesto quedó el Escenario 6 con un probabilidad de obtener el primer puesto de 73.92%. Esta ejecución coincidió con la de referencia, no se presentan variaciones en los puestos de las alternativas.



P\S	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	13.78%	23.35%	22.82%	42.85%	81.07%	73.92%
2	60.48%	53.58%	54.52%	47.53%	17.15%	24.63%
3	23.08%	19.75%	18.92%	8.35%	1.68%	1.13%
4	2.30%	3.02%	3.48%	1.07%	0.08%	0.28%
5	0.32%	0.28%	0.25%	0.18%	0.02%	0.02%
6	0.03%	0.02%	0.02%	0.02%	0.00%	0.02%

P\S: Puesto \ Solución

Figura 46. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 5, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)



En la Figura 47 se observa que los Escenarios 5 y 6 tienen un comportamiento similar con probabilidades cercanas, lo mismo sucede con los Escenarios 2 y 3.

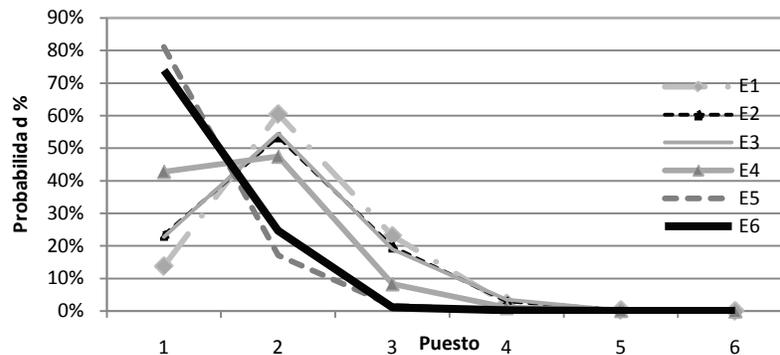
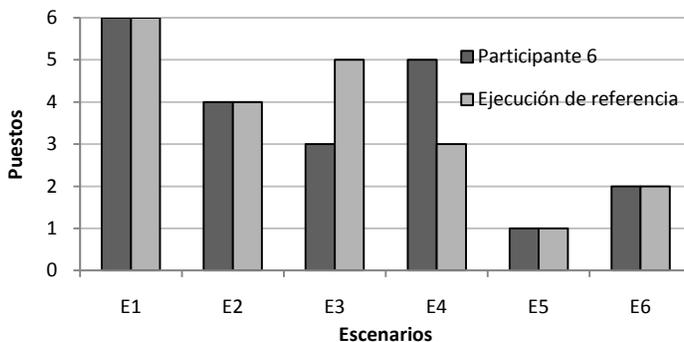


Figura 47 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 5, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

En el caso de los pesos definidos por el participante 6, el Escenario ganador fue el quinto con una probabilidad máxima de 42.12% (Figura 48), el segundo puesto lo ocupó el Escenario 6 con (40.20%), luego siguió el Escenario 3 ocupando el tercer puesto y el último puesto lo tomó el Escenario 1. Los resultados obtenidos con los pesos de este participante difieren de los puestos de la ejecución de referencia en los puestos de los Escenarios 3 y 4.



P\S	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	27.90%	33.82%	35.30%	32.73%	42.12%	40.20%
2	46.88%	42.07%	41.97%	38.65%	36.75%	38.03%
3	19.10%	17.90%	17.17%	20.57%	15.68%	15.92%
4	5.20%	5.52%	4.77%	6.53%	4.87%	4.70%
5	0.90%	0.63%	0.72%	1.43%	0.57%	1.10%
6	0.02%	0.07%	0.08%	0.08%	0.02%	0.05%

P\S: Puesto \ Solución

Figura 48. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definido por el participante 6, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

En la Figura 49 se puede observar un mismo comportamiento para todos los Escenarios, sus probabilidades fueron cercanas y no existe diferencia significativa entre ellas.

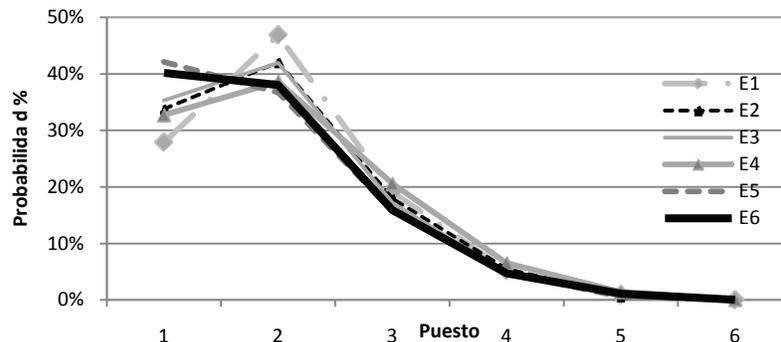
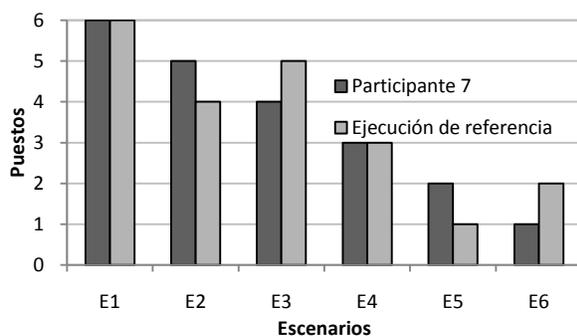


Figura 49 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definido por el participante 6, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

Para el participante 7 la alternativa ganadora fue el Escenario 6 (Figura 50), con una probabilidad del 57.37%, el puesto dos lo obtuvo el Escenario 5 con una probabilidad de 56.38%. El Escenario 1 ocupó el último puesto con la probabilidad de 16.98% más baja que las alternativas 2 y 3. Comprando con la ejecución de referencia los puestos de las alternativas 14 y 1 ocuparon el mismo puesto.



P\S	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	16.98%	30.27%	33.27%	41.03%	56.38%	57.37%
2	50.07%	45.92%	45.80%	40.08%	32.45%	32.83%
3	26.10%	19.33%	17.05%	14.63%	9.03%	7.98%
4	5.70%	4.08%	3.52%	3.77%	2.03%	1.57%
5	1.07%	0.38%	0.33%	0.48%	0.10%	0.23%
6	0.08%	0.02%	0.03%	0.00%	0.00%	0.02%

P\S: Puesto \ Solución

Figura 50. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definido por el participante 7, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

En general la diferencia crucial está en las probabilidades de cada una en el primer puesto (Figura 51).

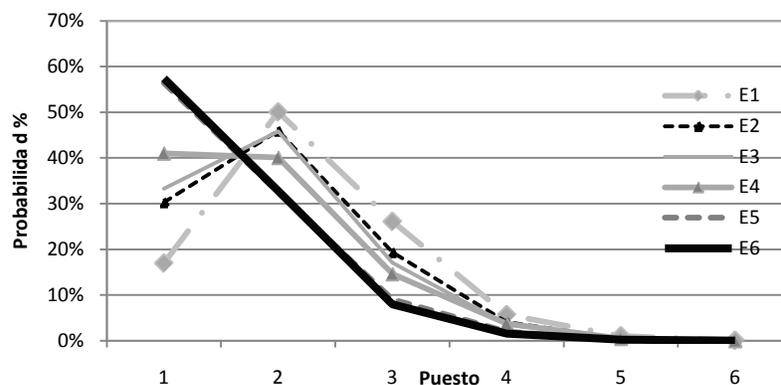


Figura 51 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 7, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

De acuerdo a los pesos definidos por el participante 8 el mejor Escenario fue el 5 (Figura 52), con una probabilidad de 61.87%, el segundo puesto lo obtuvo el Escenario 6 con una probabilidad de 57.18%. El Escenario 1 ocupó el último puesto con la probabilidad más baja de 16.02% comparado con los Escenarios 2 y 3. Esta ejecución obtuvo los mismos puestos de la ejecución de referencia.

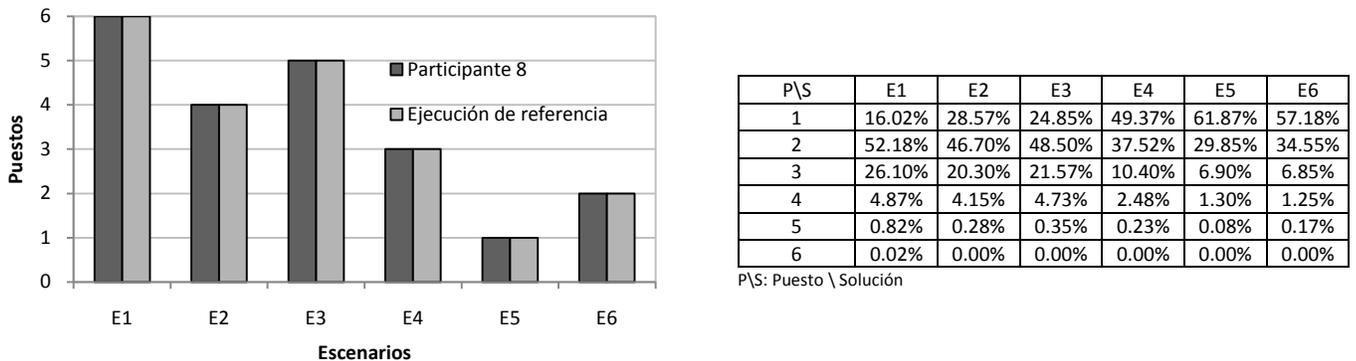


Figura 52. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 8, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

Se observó un comportamiento similar en los Escenarios 5 y 6 (Figura 53), sus probabilidades estuvieron cercanas. Lo mismo sucedió con Los Escenarios 2 y 3, su principal diferencia está en las probabilidades de obtener el puesto 1.

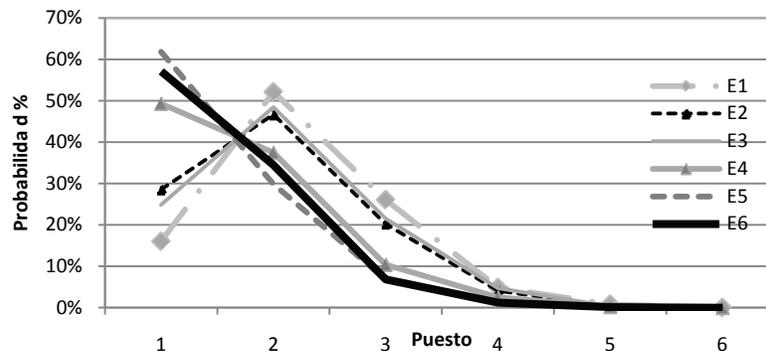
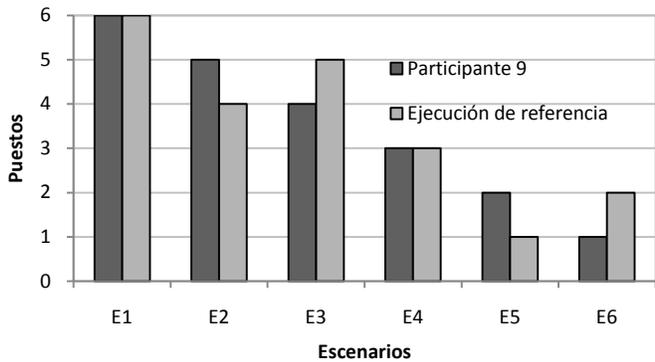


Figura 53 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definido por el participante 8, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

Por otro lado, con los resultados obtenidos con los pesos definidos por el participante 9 el Escenario 6 fue el mejor, con una probabilidad del 60.80%. (Figura 54). Ganó el segundo puesto el Escenario 5 con una probabilidad de 56.40% y la peor alternativa de acuerdo a este participante fue el Escenario 1 con una probabilidad mínima de 9.60%, siendo la menor en comparación con los Escenarios 2 y 3. En comparación con la ejecución de referencia las alternativas que coincidieron de puesto fueron los Escenarios 1 y 4.



P\S	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	9.60%	26.00%	26.07%	49.55%	56.40%	60.80%
2	50.15%	49.27%	49.45%	37.83%	35.35%	32.80%
3	32.65%	20.63%	21.20%	9.87%	6.73%	5.33%
4	6.37%	3.80%	3.08%	2.47%	1.45%	0.97%
5	1.18%	0.30%	0.20%	0.27%	0.07%	0.10%
6	0.05%	0.00%	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%

P\S: Puesto \ Solución

Figura 54. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el participante 9, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

Las alternativas 2 y 3 presentaron un comportamiento similar en sus probabilidades (Figura 55), lo mismo sucede con los escenarios 5 y 6 con unas probabilidades cercanas.

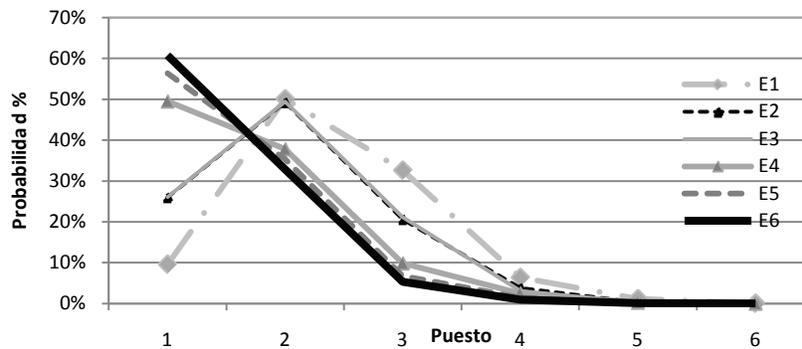


Figura 55 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por participante 9, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

De las ejecuciones anteriores, con los pesos definidos por cada participante (Figura 56), se puede observar que la mayoría coincidió que la peor alternativa es el Escenario 1. Seis de los nueve participantes estuvieron de acuerdo con el Escenario 5 ocupara el primer lugar. Para los puestos del Escenario 6 seis de nueve coincidieron en que ocupara el segundo lugar. El Escenario 4 la mayoría de los participantes estuvieron de acuerdo excepto un participante en que este escenario obtuviera el tercer puesto.

Las probabilidades de quedar en el primer puesto del Escenario 5 variaron con cada participante, entre 84% a 42%, para las probabilidades por encima de 60% se pudo apreciar que era debido a la distribución proporcional de los pesos, una gran diferencia entre el peso de un criterio u otro equivale a una menor probabilidad. A nivel general se presentaron diferencias para definir el puesto de las demás alternativas.

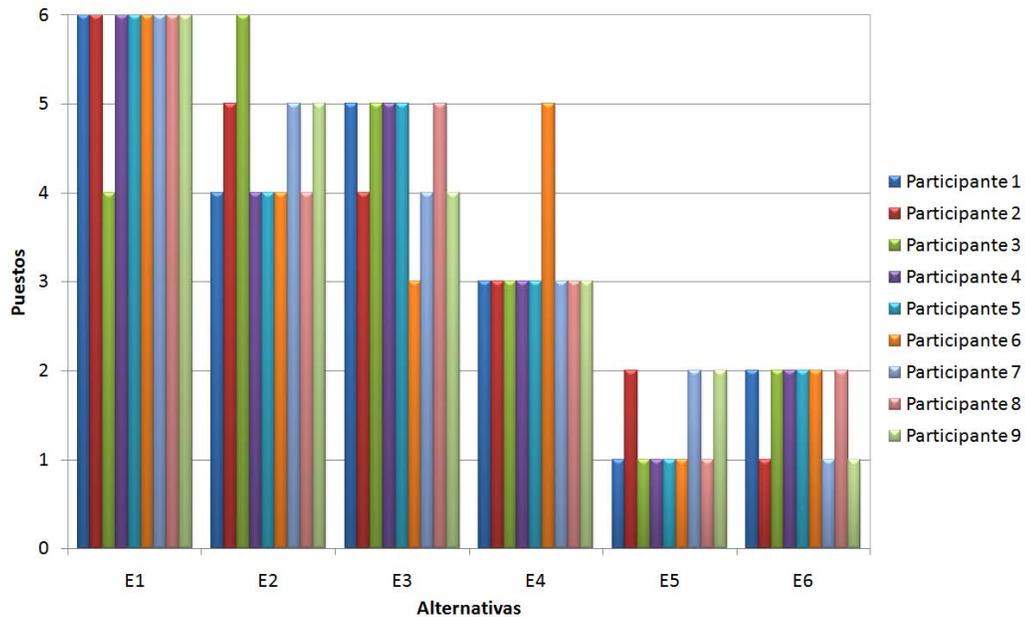
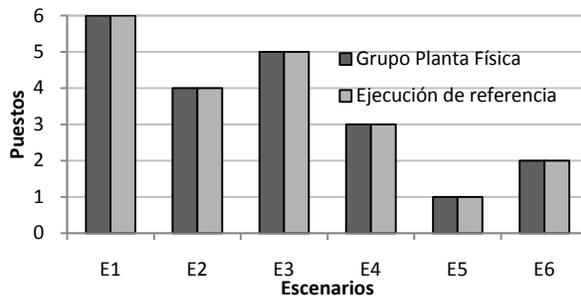


Figura 56. Resultados de la ejecución CRIDE Matriz de Posibles Soluciones y Umbrales Aleatorios, Pesos de los Criterios Definidos por los Encuestados

### c) Matriz de Posibles Soluciones y Umbrales Aleatorios, Pesos de los Criterios Agrupados

#### i. Grupos Definidos

Para el Grupo conformado la Dirección de Planta Física de la Universidad (Lina Marcela Achury Uribe, Javier Forero Torres, Pebles Fragozo Rodelo y Juan Pablo Vargas Triana) la alternativa ganadora fue el Escenario 5 con una probabilidad de 83.43% (Figura 57), el Escenario 6 ocupó el segundo puesto (69.25%), seguido por el Escenario 4 (41.03%) y la alternativa menos favorable el Escenario 1. Este resultado coincidió con la ejecución de referencia.



P\S	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	12.88%	26.18%	23.68%	41.03%	83.43%	69.25%
2	61.28%	52.68%	51.30%	50.33%	15.57%	29.32%
3	23.73%	18.62%	20.72%	7.43%	0.90%	1.30%
4	1.83%	2.38%	3.97%	1.10%	0.10%	0.13%
5	0.27%	0.12%	0.33%	0.10%	0.00%	0.00%
6	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

P\S: Puesto \ Solución

Figura 57. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el Grupo Dirección Planta Física, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

Los Escenarios 2 y 3 obtuvieron probabilidades cercanas en cada uno de los puestos (Figura 58). Para la mayoría de los escenarios la probabilidades en los puestos 4, 5 y 6 es baja.

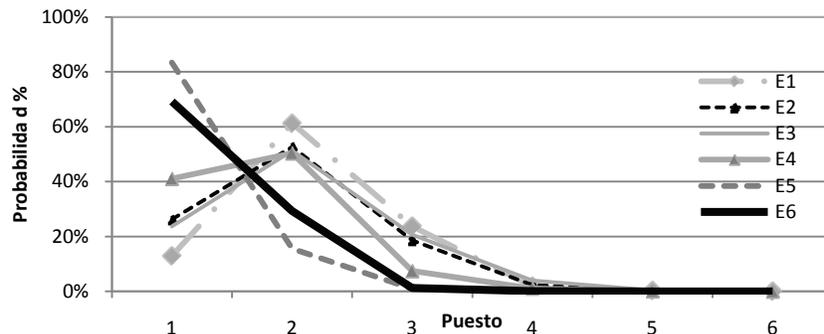
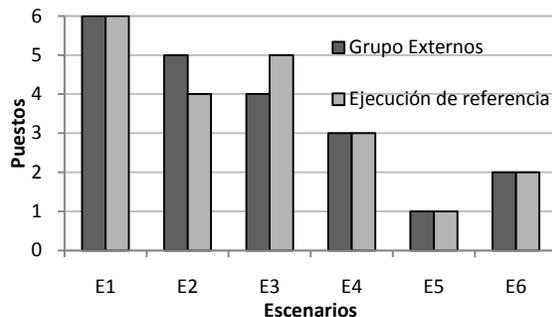


Figura 58 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por Grupo Dirección Planta Física, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

Para el grupo conformado por los expertos en el tema (Carlos Alfonso Devia Castillo, Jaime Andrés Lara Borrero, Sandra Méndez Fajardo, Alejandra Ruiz López y David Andrés Zamora Ávila), la mejor alternativa es el Escenario 5 (62.68%) (Figura 59), seguida por el Escenario 6 (60.10%) y el último puesto fue para el Escenario 1 (16.88%). Esta ejecución presentó diferencias con la ejecución de referencia, los puestos de los Escenarios 2 y 3 cambiaron.



P\S	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	16.88%	28.15%	30.68%	43.15%	62.68%	60.10%
2	51.27%	46.58%	45.93%	41.32%	29.57%	31.93%
3	26.78%	20.92%	19.43%	11.92%	6.33%	6.23%
4	4.30%	3.95%	3.62%	3.32%	1.35%	1.52%
5	0.72%	0.38%	0.33%	0.30%	0.07%	0.20%
6	0.05%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%

P\S: Puesto \ Solución

Figura 59. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el Grupo de Expertos, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

La diferencias entre los Escenario 5 y 6 no se pueden apreciar con facilidad (Figura 60), estas dos alternativas tienen probabilidades cercanas.

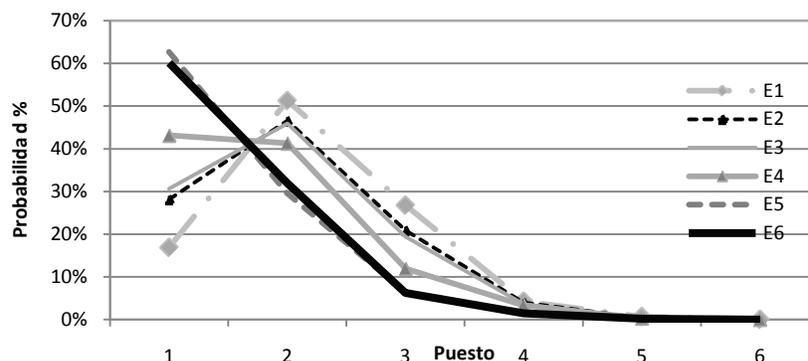
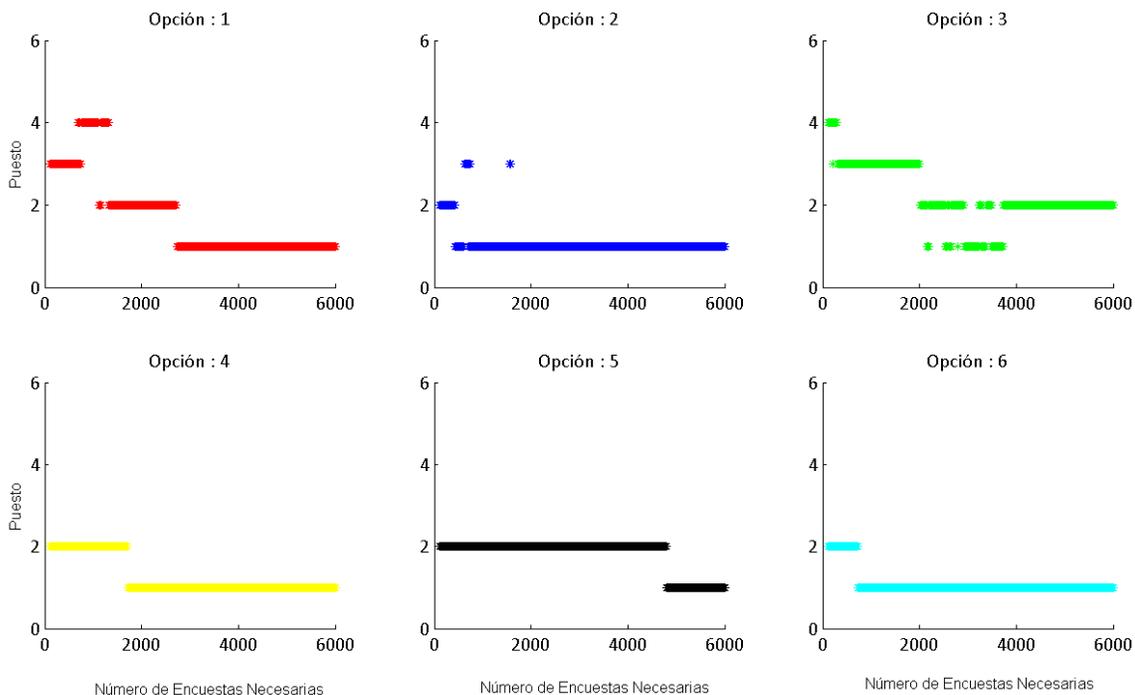


Figura 60 Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz y Umbrales aleatorios y Pesos definidos por el Grupo de Expertos, para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

De lo anterior se puede apreciar que el grupo que coincidió con el escenario de referencia fue el grupo integrado por la Dirección de Planta Física de la Universidad, ya que no se presentan variaciones en los puestos de los Escenarios

## ii. Grupos Aleatorios

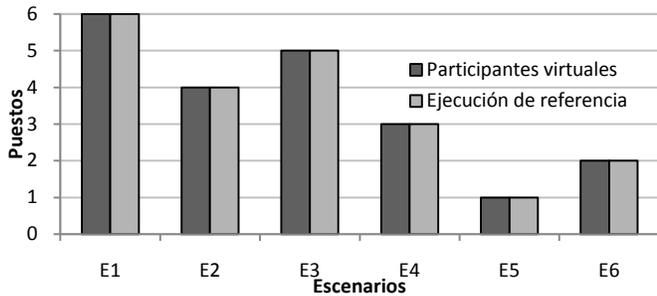
Se crearon grupos aleatorios a partir de los participantes virtuales, en cada simulación se iban agregando de uno a uno, hasta llegar al número de personas en el grupo necesarias para que los Escenarios tomaran los puestos definitivos. En la Figura 61 se observa que en el número de encuestas necesarias en donde se estabilizan los puestos de las opciones o escenarios se encuentra aproximadamente a partir de 5000, lo cual indica la variabilidad de las opiniones de los 9 encuestados es tal que sería necesario encuestar a 5000 personas.



**Figura 61.** Resultados con la rutina CRIDE, Matriz de Posibles Soluciones y Umbrales de Concordancia aleatorios, y Pesos definidos por Grupos aleatorios (Fuente: elaboración propia)

## d) Matriz de Posibles Soluciones y Umbrales Aleatorios, Participantes Virtuales

A partir de los resultados de la encuesta se crearon participantes virtuales en cada una de las simulaciones (6000). El Escenario en obtener la probabilidad más alta en el primer puesto fue el 5 (67.30%) (Figura 62) y en el segundo puesto queda el Escenario 6 con un probabilidad de 60.08%. En cambio la probabilidad más baja en ocupar el primer puesto lo consiguió el Escenario 1 con 14.33%. Comparando esta ejecución con la de referencia no se presentan diferencias entre los puestos. Las probabilidades de los Escenarios 2 y 3 resultaron cercanas (Figura 63)



P\S	E1	E2	E3	E4	E5	E6
1	14.33%	25.60%	25.58%	40.97%	67.30%	60.08%
2	53.17%	48.77%	48.50%	43.82%	26.50%	33.07%
3	27.03%	21.58%	20.87%	12.17%	4.90%	5.85%
4	4.63%	3.68%	4.63%	2.62%	1.22%	0.80%
5	0.75%	0.35%	0.40%	0.42%	0.08%	0.20%
6	0.08%	0.02%	0.02%	0.02%	0.00%	0.00%

P\S: Puesto \ Solución

Figura 62. Resultados con la rutina CRIDE, Matriz de Posibles Soluciones y Umbrales de Concordancia aleatorios, y Pesos definidos por Participantes Virtuales aleatorios para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

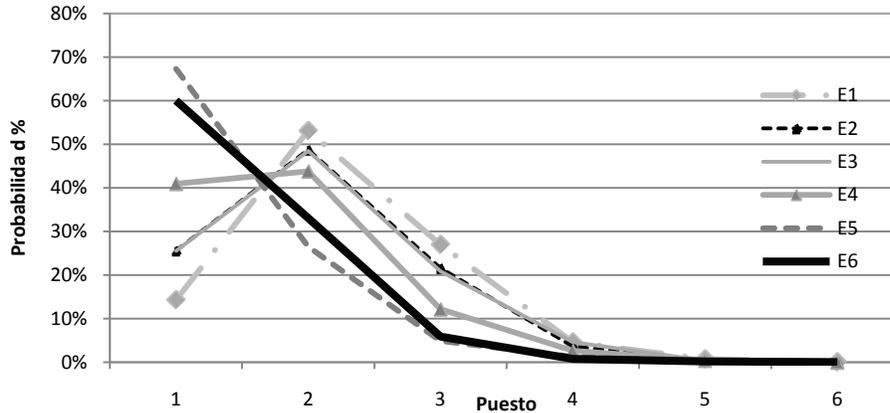


Figura 63. Probabilidad de cada Escenario en ocupar los puestos, Matriz de Posibles Soluciones y Umbrales de Concordancia aleatorios, y Pesos definidos por Participantes Virtuales aleatorios para 6000 simulaciones (Fuente: elaboración propia)

### 5.2.8 CRIDE- Evaluado Robustez, Redundancia de Criterios y Sensibilidad de los pesos

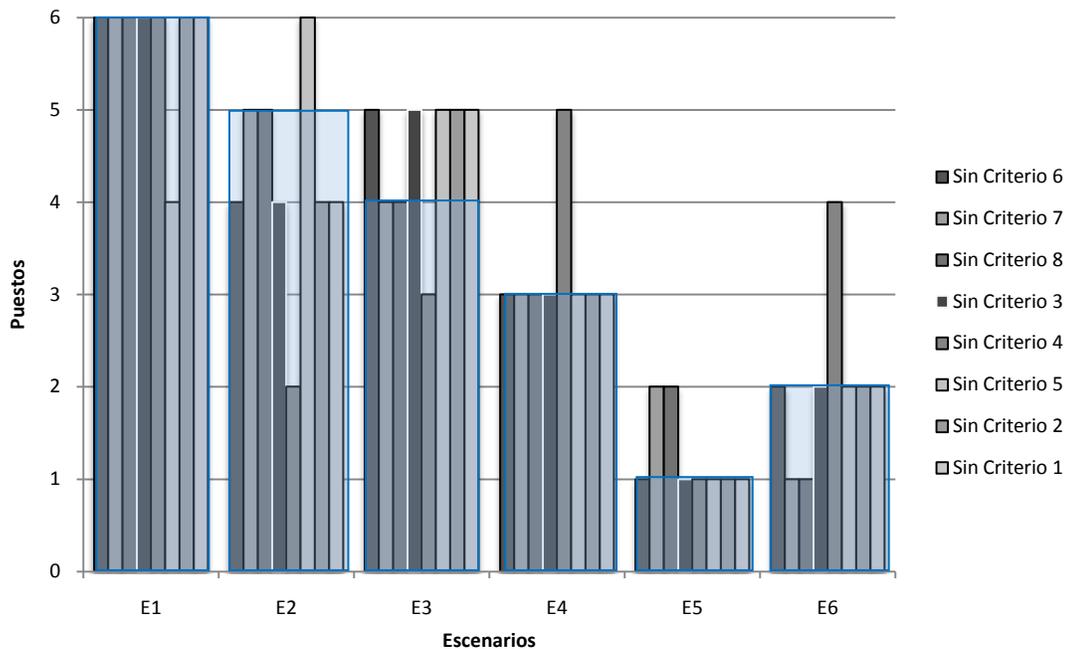
Para evaluar la pertenencia de los criterios (robustez), se ejecutó la rutina CRIDE quitando un criterio a la vez. El proceso inició retirando el criterio con menos peso y así sucesivamente.

Los criterios se fueron retirando en el siguiente orden:

- Criterio 6 Impacto en fase de construcción Vs. Cobertura – IFCC
- Criterio 7 Valor Presente Neto (VPN) – IAVPN
- Criterio 8 Tasa Interna de Retorno Vs. Tasa Inversión Externa – IRTIR
- Criterio 3 Probabilidad de falla del sistema - IPFS
- Criterio 4 Necesidad y frecuencia de operación y mantenimiento – INFOM

- Criterio 5 Contribución a las políticas de desarrollo del campus – ICPM
- Criterio 2 Eficiencia de retención de contaminantes – IRC
- Criterio 1 Rendimiento hidráulico – IRHidra

Los resultados se pueden ver en la Figura 64.



**Figura 64.** Puestos de los Escenarios retirando uno a uno los criterios. Los cuadros azules muestran la ejecución de referencia: 1 puesto E5, 2 puesto E6, 3 puesto E4, 4 puesto E3, 5 puesto E2 y 6 puesto E1 (Fuente: elaboración propia)

Se puede apreciar que si se retira el criterio 4, se afecta el puesto del Escenario 4 (el tercer puesto - ejecución de referencia) y el puesto del Escenario 6 (segundo puesto). En el caso de retirar los criterios 7 y 8 afecta al puesto del escenario 5 (primer puesto) y 6 (segundo puesto). Si se retira el criterio 3 afecta al escenario 3 y el 2, lo mismo sucede con el criterio 4. Al retirar el criterio 5 se altera el puesto de los Escenarios 2 y 3. Las alternativas más vulnerables al cambio de puesto si se retira algún criterio son los Escenario 2 y 3.

Para conocer el primer puesto es necesario contar con los criterios 7 y 8, alguno de los demás criterios pueden no estar. Por otro lado, si se requiere conocer el segundo puesto es necesario contar con los criterios mencionados anteriormente y el criterio 4, y si sólo se desea conocer los primeros tres puestos se podría quitar alguno de los criterios excepto los mencionados anteriormente.

Para evaluar la redundancia de criterios, se combinaron los criterios por pares y se ejecutó la opción 0 de CRIDE y se graficó la suma de las diferencias de puesto con el puesto de referencia (Indicador de redundancia) (Figura 65), se observó que probablemente las parejas de criterios que pueden ser



redundantes, en el cual el indicador de redundancia no varía) son los criterios 2 -3, los criterios 2 - 4 los criterios 5 - 6, los criterios 5 - 7 y los criterios 5 - 8.

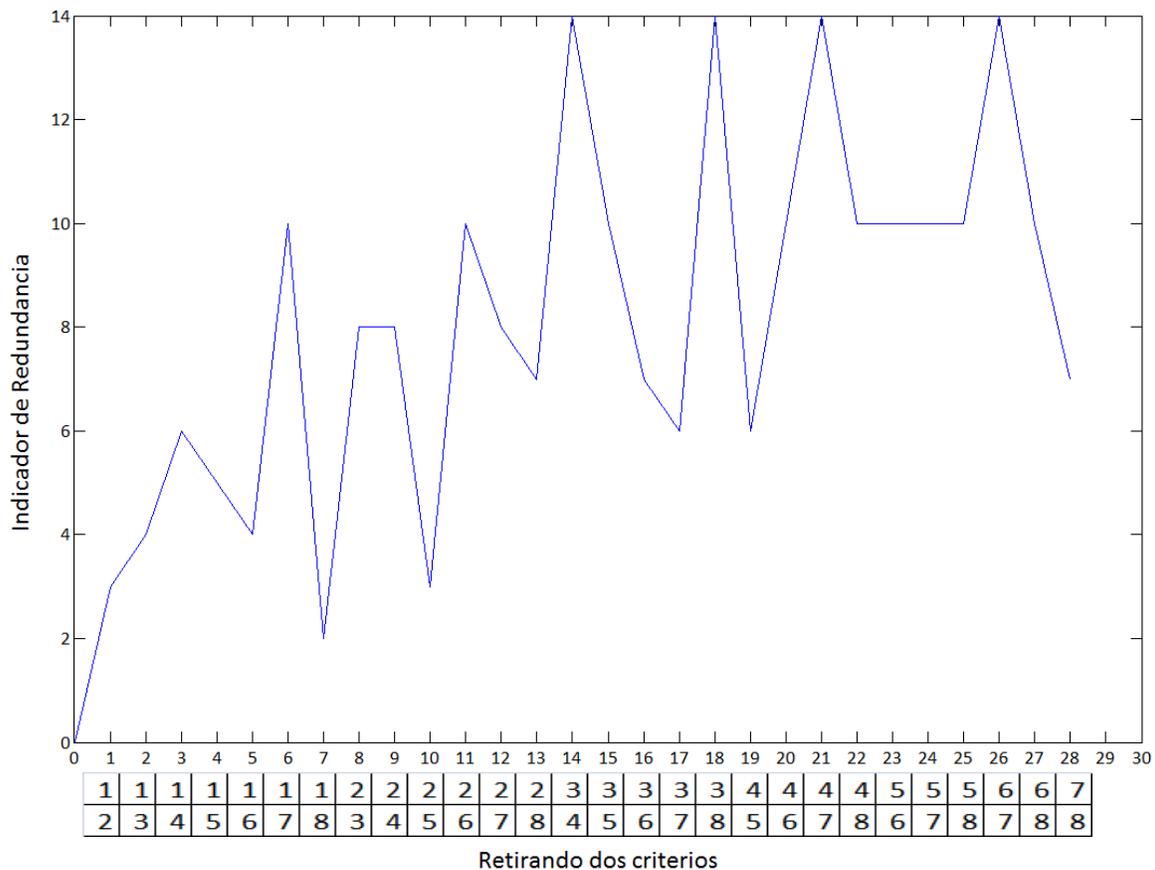


Figura 65. Indicador de Redundancia (Fuente: elaboración propia)

Con las parejas posibles parejas de criterios redundantes (2 -3, 2 - 4, 5 - 7 y 5 - 8) se realizó la ejecución con CRIDE – Opción 5 para observar si los resultados obtenidos por cada par de criterios era el mismo. En a Figura 66 se observan los resultados, la parejas de los criterios 2 -3 y 2 -4 generaron resultados distintos, por otro lado con las parejas 5 - 7 y 5 - 8 se obtuvieron los mismos resultados. Lo cual nos indica que los criterios 7 y 8 son redundantes, no se requieren de ambos.

Adicionalmente, para evaluar la sensibilidad (la incertidumbre) de los criterios se dejó un criterio sin aleatoriedad y se ejecutó CRIDE – Opción 5 con los demás pesos aleatorios, la matriz de posibles soluciones y los umbrales aleatorios. Se realizó el ejercicio para todos los criterios, de uno en uno.

De acuerdo a los resultados obtenidos (Figura 67) no se presentaron grandes variaciones, en general se puede dejar el peso promedio de unos de los criterios debido a que no se producen cambios en los puestos de las alternativas, excepto para los criterios 1, 6 y 7 los cuales si se dejan fijos las alternativas 3 y 2 cambian de puesto.

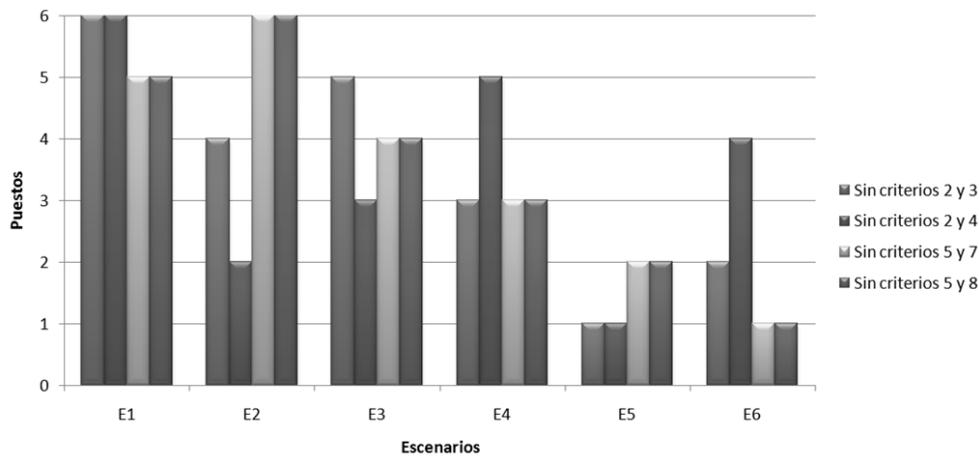


Figura 66. Puestos de los Escenarios retirando los criterios 2 y 3, 2 y 4, 5 y 7, y 5y8. (Fuente: elaboración propia)

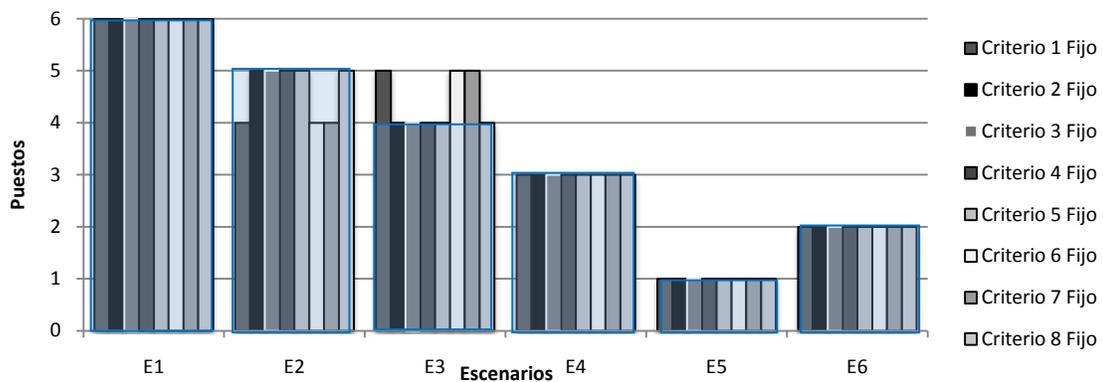


Figura 67. Puestos de los Escenarios dejando uno a uno los pesos de cada criterio. Los cuadros azules muestran la ejecución de referencia: 1 puesto E5, 2 puesto E6, 3 puesto E4, 4 puesto E3, 5 puesto E2 y 6 puesto E1 (Fuente: elaboración propia)

A pesar de que hace ya algunos años en Colombia se conocen los fundamentos de varios métodos de análisis multi-criterio (AMC) (ver por ejemplo Smith *et al.*, 2000) y que ya se han aplicado algunos en casos de estudio específicos (ver por ejemplo Galvis *et al.*, 2005), esta es la primera vez en Colombia que se utiliza específicamente el método AMC ELECTRE II. Cabe anotar que la herramienta desarrollada CRIDE es una modificación de ELECTRE II, con la cual se propone un nuevo método basado en Monte Carlo, con el propósito de contemplar variabilidades como la diversidad de opinión, la incertidumbre y las evaluaciones imprecisas de los criterios. Hasta el momento un método similar no ha sido reportado en la literatura. Por otro lado, CRIDE se diferencia de ELECTRE III en que este último contempla métodos provenientes de la lógica difusa, permitiendo la inclusión umbrales difusos.

Adicionalmente el enfoque desarrollado en CRIDE, basado en Monte Carlo, permitió proponer una aproximación metodológica para evaluar la pertinencia del juego de criterios establecidos en cuanto a la robustez, redundancia y sensibilidad, lo cual puede ser de utilidad en el proceso de definición de criterios, considerado uno de los aspectos claves en la toma de decisiones (Moura, 2008).

## 6 CONCLUSIONES

Con el desarrollo de CRIDE como herramienta para soportar el proceso de toma de decisiones se propone un nuevo método basado en Monte Carlo, con el propósito de contemplar variabilidades como la diversidad de opinión, la incertidumbre y las evaluaciones imprecisas de los criterios. Hasta el momento un método similar no ha sido reportado en la literatura.

CRIDE ayuda a seleccionar la alternativa más conveniente teniendo en cuenta múltiples intereses y criterios, pero no toma la decisión final ni sustituye a los decisores. En efecto, el AMC ayuda a que una toma de decisiones grupal sea racional, permita responder al por qué de la decisión y se pueda tener capacidad de auditoría, debido a la trazabilidad en el proceso. En el caso del presente estudio se pudo observar que la visión de los criterios y pesos por parte de los participantes direccionan la toma de decisiones, sin que necesariamente todos los participantes conozcan de manera profunda cada una de las alternativas, lo que facilita el proceso de toma de decisión.

Al utilizar *CRIDE* para apoyar la toma de decisiones en el aprovechamiento de las aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, se generó un panorama de las posibles opciones en las que se podría llevar a cabo este aprovechamiento. El hecho de construir la matriz de desempeño de las soluciones para aprovechamiento de las aguas lluvias utilizando la metodología AMC implica un acercamiento inicial al proceso de toma de decisiones, ya que, para obtener dicha matriz, cada alternativa debe evaluarse con respecto a la totalidad de los criterios acordados, generando una base adecuada de comparación entre soluciones. Desde este punto de vista, esta matriz puede convertirse además en una lista de chequeo, la cual podría utilizarse como guía para el grupo decisor, exigiendo que el desempeño de cada alternativa sea evaluado para la totalidad de criterios considerados.

A pesar de que hace ya algunos años en Colombia se conocen los fundamentos de varios métodos de análisis multi-criterio (AMC) (ver por ejemplo Smith *et al.*, 2000) y que ya se han aplicado algunos en casos de estudio específicos (ver por ejemplo Galvis *et al.*, 2005), esta es la primera vez en Colombia que se utiliza específicamente el método AMC ELECTRE II (CRIDE – Opción 0).

A nivel general se llegó a establecer que la mejor alternativa para el aprovechamiento de agua lluvia en el campus universitario es el Escenario 5 (inversión inicial \$ 485,603,092; años para el retorno de la inversión 5 años; porcentaje de ahorro 61%), el cual cubriría los usos no potables para todas las cuencas excepto para 1 de ellas (7 Giraldo). El segundo puesto lo ocupó el Escenario 6 (inversión inicial \$ 483,508,167; años para el retorno de la inversión 6 años; porcentaje de ahorro 48%), el cual contempla cubrir sólo el riego de jardines para las mismas cuencas contempladas en el Escenario 5. El tercer puesto lo ganó el Escenario 4 (inversión inicial \$ 514,693,107; años para el retorno de la inversión 7 años; porcentaje de ahorro 76%), que implica el aprovechamiento de las aguas lluvias recolectadas para todos los usos (potables y no potables) para todas las cuencas excepto para 1 de ellas (7 Giraldo). Los últimos puestos los ocuparon los Escenarios 3, 2, y 1 (cuarto, quinto y sexto puesto), los cuales cubren todas las cuencas (doce en total) y los usos varían: el Escenario 3 sólo cubriría el uso de riego, el Escenario 2 los usos no potables y el Escenario 1 todos los usos (potable y no potables).

Cuando se efectuaron las diversas ejecuciones: (i) CRIDE – Opción 0, (ii) CRIDE – Opción 5 y (iii) CRIDE con los pesos definidos por los encuestados se pudo observar los aspectos descritos a continuación.

Al utilizar la herramienta CRIDE– Opción 0 (sin aleatoriedad) se encontró que no es suficiente para obtener el ranking entre las alternativas, debido a que se presentan empates entre éstas. Por otra parte, observando los resultados de la Opción 1, la Opción 2, la Opción 3, la Opción 4 y la Opción 5, los escenarios más propensos al cambio de posición en sus puestos son los primeros tres, siendo los Escenarios 4, 5 y 6 los más estables. Adicionalmente, en la mayoría de las ejecuciones, la alternativa 5 ocupó el primer puesto y la alternativa 6 el segundo puesto, excepto en la Opción 2 (variación de los pesos de los criterios) y la Opción 5 (variación de los umbrales de concordancia). Esto refleja la variabilidad de los participantes en la definición de los pesos de los criterios y para el caso de los umbrales se debe a la cercanía de las calificaciones de los dos escenarios, entonces si se varían los umbrales de concordancia (los límites de las relaciones entre las alternativas), sus posiciones pueden intercambiarse.

Cuando se evaluaron las alternativas con cada uno de los pesos definidos por los participantes sin considerar aleatoriedad, en algunos casos se presentaron empates entre las alternativas. Se observó que para el Escenario 1 cuatro de los nueve participantes estuvieron de acuerdo en que ocupara el primer puesto y para el segundo puesto dos participantes coincidieron y para el segundo puesto dos participantes coincidieron. Para dos participantes el Escenario 2 ocupó el primer puesto, para tres el cuarto puesto y para dos participantes el quinto puesto. Para el Escenario 3 seis participantes de los nueve estuvieron de acuerdo en que el ocupara el primer puesto. Tres de los nueve participantes estuvo de acuerdo con que el Escenario 4 ocupara el último puesto y el Escenario 5 ocupara el primer puesto. Para el Escenario 6 cinco de nueve participantes coincidieron en que ocupara el segundo puesto. En este ejercicio se pudo observar la preferencia de cada participante (sus intereses), por ejemplo el criterio que recibió mayor calificación fue el rendimiento hidráulico (IRHidra) por parte del participante 6, lo cual implica que los escenarios que mejor calificación tenían en este criterio fueron los que ocuparon los primeros puestos. Algo similar sucede con la calificación de los dos últimos criterios (Valor Presente Neto – IAVPN y Tasa Interna de Retorno Vs. Tasa Inversión Externa – IRTIR): los participantes que le dieron el peso más alto a estos criterios (Participantes 1, 3 y 4) escogieron las alternativas más interesantes económicamente en los primeros dos puestos (Escenarios 5 y 6).

De acuerdo a los resultados obtenidos cuando se evaluaron las alternativas con cada uno de los pesos definidos por los participantes considerando aleatoriedad, las probabilidades de obtener el primer puesto para el Escenario 5 variaron con cada participante entre 84% a 42%. Para este mismo escenario, cuando dicha probabilidad se encuentra por encima de 60% se pudo apreciar que era debido a la distribución proporcional de los pesos: una gran diferencia entre el peso de un criterio u otro equivale a una menor probabilidad. En esta ejecución se logró un mayor acuerdo para los puestos de las alternativas: primer puesto para el Escenario 5 de acuerdo a seis de nueve encuestados, segundo puesto para el Escenario 6 de acuerdo a seis de nueve encuestados y el tercer puesto para el Escenario 4 de acuerdo a ocho de nueve encuestados.



De los resultados de la ejecución por grupos se observó que el grupo integrado por la Dirección de Planta Física de la Universidad coincidió totalmente con el escenario de referencia (Primer puesto: Escenario 5 – 83.43%, segundo puesto: Escenario 6 - 69.25%, tercer puesto: Escenario 4 – 41.03%, cuarto puesto: Escenario 2 – 26.18%), no se presentaron variaciones en los puestos de los Escenarios respecto a la ejecución de referencia. Para el grupo conformado por los expertos en el tema (Carlos Alfonso Devia Castillo, Jaime Andrés Lara Borrero, Sandra Méndez Fajardo, Alejandra Ruiz López y David Andrés Zamora Ávila), la alternativa ganadora fue el Escenario 5 con una probabilidad de 62.68%, el Escenario 6 ocupó el segundo puesto (60.10%), seguido por el Escenario 4 (43.15%) y la alternativa menos favorable el Escenario 1.

Cuando se generaron participantes virtuales, se observó que comparando esta ejecución con la de referencia no se presentan diferencias entre los puestos de las alternativas, por lo tanto se podría decir que este tipo de variación no tiene ninguna implicación cuando se desea conocer las alternativas que ocupan los puestos. Acerca de la generación de grupos virtuales para determinar el número de encuestas, se observa que el número de encuestas necesarias en donde se estabilizan los puestos de las opciones o escenarios se encuentra aproximadamente a partir de 5000, lo cual indica la variabilidad de las opiniones de los 9 encuestados es tal que sería necesario encuestar a 5000 personas.

Al evaluar la robustez de la herramienta se observó que no se podría eliminar alguno de los criterios si sólo interesa conocer cuál es la mejor alternativa. Por otro lado, si se requiere conocer el primer puesto es necesario contar con los criterios 7 y 8 (Valor Presente Neto (VPN) – IAVPN y Tasa Interna de Retorno Vs. Tasa Inversión Externa – IRTIR), y si sólo se desea conocer los primeros tres puestos se podría quitar alguno de los criterios excepto los mencionados anteriormente incluyendo el criterio 4 (Necesidad y frecuencia de operación y mantenimiento – INFOM).

Acerca de la redundancia de los criterios 7 y 8 (Valor Presente Neto (VPN) – IAVPN y Tasa Interna de Retorno Vs. Tasa Inversión Externa – IRTIR) son redundantes, pero su no inclusión pueden variar el resultado inicial de la herramienta (1 puesto E5, 2 puesto E6, 3 puesto E4, 4 puesto E3, 5 puesto E2 y 6 puesto E1). Al evaluar la sensibilidad de los criterios no se presentaron grandes variaciones (no se producen cambios en los puestos de las alternativas): en general se puede dejar el peso promedio de unos de los criterios debido a que no se producen cambios en los puestos de las alternativas, excepto para los criterios 1, 6 y 7 los cuales si se dejan fijos las alternativas 3 y 2 cambian de puesto

## 7 RECOMENDACIONES

A pesar de que en este proyecto se evaluaron algunas características claves para la definición de los criterios a utilizar en una actividad de toma de decisiones, para futuros proyectos de investigación es necesario concentrarse en la evaluación de los criterios contemplando la totalidad de los siguientes aspectos: (i) idoneidad – que reflejen el significado completo de un concepto, (ii) accesibilidad – calculable a un costo aceptable, (iii) fidelidad – tendencia constante, (iv) objetividad – estimados sin ambigüedades –, (v) precisión y robustez – fiabilidad de la evaluación con un error aceptable, (vi) sensibilidad – capacidad de discriminar las soluciones y (vii) univocidad – dar valor interpretable unívocamente (Moura P, 2008). Lo anterior pone de manifiesto un desafío en cuanto al desarrollo de herramientas de AMC para condiciones no ideales de trabajo: ¿cómo desarrollar una herramienta de AMC que otorgue resultados fieles a las opiniones del grupo decisor y/o de los encuestados sin que necesariamente se garantice un juego de criterios que cumpla con las características enunciadas anteriormente?

Respeto a la herramienta desarrollada CRIDE, sería interesante en próximas investigaciones modificar CRIDE adicionándole la incorporación de variables lingüísticas con Lógica Difusa.

Para facilitar la interacción del usuario con la herramienta CRIDE se podría mejorar la interface, ayudando al usuario en el ingreso de datos e identificando posibles errores. Se recomienda el desarrollo de un manual detallado con la explicación de las variaciones implementadas en el algoritmo base, además con ejemplos de aplicación que ilustren cómo funciona el programa. Adicionalmente, se recomienda la posible implementación del algoritmo en un compilador más robusto (FORTRAN, C++) asociado a hardware más poderoso, el cual ofrezca como ventaja un menor tiempo de cómputo: en este trabajo se obtuvieron resultados luego de tiempos de espera variables entre 10 min y 1 hora para 10000 simulaciones utilizando CRIDE con variaciones en la matriz de posibles soluciones, los pesos de los criterios y los umbrales de concordancia.

La construcción de la matriz de posibles soluciones depende de la creación de los escenarios, los cuales están en función de la oferta y demanda de agua en el campus. En el caso de la demanda se utilizaron los datos de las cuenta contrato otorgadas por la EAAB y del inventario de usos (Estupiñán y Zapata, 2010). Esta información es de carácter aproximado y por lo tanto es importante garantizar mejores datos de oferta y demanda que permitan afinar la construcción de los escenarios correspondientes. Para lo anterior se recomienda conocer de manera detallada la demanda de agua y tipificar los diferentes consumos en los edificios del campus, implementando el uso de contadores por edificio y micromedidores de alta precisión identificando patrones de consumo. En cuanto a la oferta de agua para suplir la demanda se recomienda hacer interpolaciones entre las estaciones más cercanas y aprovechar los datos de la estación dentro del campus sin descuidar los datos históricos.

Para utilizar esta herramienta para el aprovechamiento de aguas lluvias en otras cuencas se recomienda contar con la información detallada de la oferta y consumo de agua para construir los escenarios, definir los pesos de los criterios con los actores interesados y evaluar la pertinencia de los criterios definidos en este trabajo para cada caso.



Para otros problemas de toma de decisión se recomienda inicialmente definir las alternativas a evaluar, seguido por cómo se van a evaluar éstas construyendo los criterios, lo cuales deben ser idóneos, asequibles, con tendencia constante, objetivos, precisos, robustos, sensibles y unívocos. Adicionalmente, en la definición de los criterios es importante hacerlos partícipes a las personas involucradas en el proyecto o afectadas por él para generar participación y apropiación.



## 8 REFERENCIAS

Abrishamchi A., Ebrahimian A., Tajrishi M., Marino MA. (2005). Case study: application of multicriteria decision making to urban water supply. *Journal of Water Resources Planning and Management* 131(4):326–335

Agudelo Quintero M. y Sanabria Nuñez J. (1999). *Sistema para el aprovechamiento de agua lluvia en zonas comunales de vivienda multifamiliar para Santafé de Bogotá*. Trabajo de grado, Universidad Nacional, Bogotá, Colombia.

A.H.E.P.E. - Asociación de Historia de la Estadística y de la Probabilidad en España (2006). *Historia de la Estadística y de la Probabilidad*. 1 ed., Delta Publicaciones Universitarias, Madrid, España. ISBN-8496477258

Aponte Reyes A. y Restrepo Tarquino I. (2005). *Modelo conceptual para la toma de decisiones en el sector de abastecimiento de agua, saneamiento básico e higiene*. Trabajo de grado, Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad de Valle, Santiago de Cali, Colombia.

Araújo de Castro A., Rogério P., Dantas M. (2007). Applying a Decision Making Model in the Early Diagnosis of Alzheimer's Disease, en: *Rough Sets and Knowledge Technology*. Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer-Verlag

Arboleda G. (2003). *Proyectos – Formulación, Evaluación y Control*. 5ed, AC Editores, Cali, Colombia. ISBN 958-96485-0-9

ARC - Atlanta Regional Commission, Georgia DNR - Department of Natural Resources-Environmental Protection Division. (2001). *Georgia Stormwater Management Manual, Volume 2: Technical Handbook*. Atlanta. USA. <http://www.georgiastormwater.com/> (Último acceso: 22 de abril de 2011)

Ayyub B. y Mccuen R. (2003). *Probability, Statistics, and Reliability for Engineers and Scientists*. 2nd ed, Chapman and Hall / CRC Press LLC, Boca Raton, USA. ISBN 1-58488-286-7

Baca, G. (1992). *Ingeniería Económica*. 2ed, Editorial Educativa, Bogotá, Colombia. ISBN 958-9188-07-9

Ballén Suárez J. y Galarza García M., Ortiz Mosquera R. (2004). *Estudio de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias para edificaciones de vivienda urbana*. Trabajo de grado, Universidad Nacional, Bogotá, Colombia.

Baptista M., Barraud S., Alfakih E., Nascimento N., Fernandes W., Moura P., Castro L. (2004. Junio). Proposal of an evaluation system for urban storm drainage. Documento presentado en: *NOVATECH 2004, 5th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management*. Lyon, Francia.

Ben-Arieh D. y Chen Z., (2006). Linguistic group decision-making: opinion aggregation and measures of consensus. En: *Fuzzy Optim Decis Making*; octubre de 2006 5(4): 371-386

BVC - Bolsa de Valores de Colombia. (2011). Comportamientos del mercado en abril de 2011. [http://www.bvc.com.co/pps/tibco/portalbvc/Home/Mercados/informesbursatiles?com.tibco.ps.pagesvc.action=updateRenderState&rp.currentDocumentID=5410c874\\_12feb50ea77\\_2f0c0a84c5b&rp.attachmentPropertyName=Attachment&com.tibco.ps.pagesvc.targetPage=-36c0e342\\_11de59a6ea2\\_-7972c0a84c5b&com.tibco.ps.pagesvc.mode=resource&rp.redirectPage=-36c0e342\\_11de59a6ea2\\_-797bc0a84c5b](http://www.bvc.com.co/pps/tibco/portalbvc/Home/Mercados/informesbursatiles?com.tibco.ps.pagesvc.action=updateRenderState&rp.currentDocumentID=5410c874_12feb50ea77_2f0c0a84c5b&rp.attachmentPropertyName=Attachment&com.tibco.ps.pagesvc.targetPage=-36c0e342_11de59a6ea2_-7972c0a84c5b&com.tibco.ps.pagesvc.mode=resource&rp.redirectPage=-36c0e342_11de59a6ea2_-797bc0a84c5b) (Último acceso: 02 de mayo de 2011)

Bana e Costa CA., De Corte JM. y Vansnick JC. (2005). On the mathematical foundation of MACBETH. En: *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys.*, J. Figueira, G. Salvatore, M. Ehrgott (eds.), Springer Science + Business Media, Inc., Boston, pp409–442

Banrep - Banco de la República. (2011). Tasa de Intervención Banco de la República. <http://obiee.banrep.gov.co/analytics/saw.dll?Go&NQUser=publico&NQPassword=publico&Path=/shared/Consulta%20Series%20Estadisticas%20desde%20Excel/1.%20Tasa%20de%20intervencion%20de%20politica%20monetaria/1.1.%20Tasa%20de%20intervencion%20BR%20-%20Serie&Options=rdf> (Último acceso: 02 de mayo de 2011)

Baptista M., Barraud S., Alfakih E., Nascimento N., Fernandes W., Moura P., Castro L. (2004). Proposal of an evaluation system for urban storm drainage. *NOVATECH 2004, 5th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management*. Lyon, France, 2004, p.441-448.

Belacel N. (2000). Multicriteria assignment method PROAFTN: Methodology and medical application. *European Journal of Operational Research*, (125), 175–183

Ben-Arieh D., Chen Z. (2006). Linguistic-Labels Aggregation and Consensus Measure for Autocratic Decision Making Using Group Recommendations. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part a: Systems and Humans*, (36) 3, 558–568

Bogoya Jerez A. y Saldarriaga Valderrama J. (2008a). *Aprovechamiento del agua lluvia con análisis de cantidad y calidad: casos de estudio: edificio Mario Laserna de la Universidad de los Andes y el colegio Nueva Granada*. Trabajo de grado, Ingeniería Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Bolsa y Renta. (2011). Ficha Técnica Cartera Colectiva Escalonada Factoring ByR – Promedio. [http://www.bolsayrenta.com/secciones/BYR/HOME/CCOL/CCFACT/documento\\_HTML.jsp?idDocumento=70&cambio=SI](http://www.bolsayrenta.com/secciones/BYR/HOME/CCOL/CCFACT/documento_HTML.jsp?idDocumento=70&cambio=SI) (Último acceso: 11 de mayo de 2011)

Brans JP., Vincke PH., Marshal B. (1986). How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research* (24):228–238

Brown S., Stein S., Warner J. (2001). *Urban Drainage Design Manual Hydraulic Engineering Circular 22*, 2nd Ed., U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC (2001).

Caicedo Mosquera E. y Sánchez L. (2001). *Estudio sobre el uso del agua lluvia como sistema de abastecimiento: caso: La Bocana, corregimiento del Municipio de Buenaventura*. Trabajo de grado, Ingeniería Civil, Universidad de Valle, Santiago de Cali, Colombia.

Calderón M. y Espinel R. (2003). Campus Pontificia Universidad Javeriana. <http://www.javeriana.edu.co/puj/campus/presentacion.htm> Final. (Último acceso: 04 de mayo de 2011)

Carlsson, C. y R. Fullér (2000) "Multiobjective linguistic optimization" *Fuzzy sets and systems*, 115(2000) 5-10

Chávez Alfonso L., Gutierrez Nuñez A. y Mustafa Chacon J. (1993). *Prototipo de un sistema basado en el conocimiento para soporte en la toma de decisiones en el uso adecuado del agua –AQUASYS*. Trabajo de grado, Ingeniería de Sistemas y Computación, Pontificia Universidad Javeriana, Santiago de Cali, Colombia.

Chen C., Hung W. (2009). Applying ELECTRE and Maximizing Deviation Method for Stock Portfolio Selection under Fuzzy Environment, en: *Studies in Computational Intelligence. Opportunities and Challenges for Next-Generation Applied Intelligence*. Berlin: Springer-Verlag

CIRIA - Construction Industry Research and Information Association. (2004) Report 609 Sustainable Drainage Systems, Hydraulic, Structural and Water Quality Advice. CIRIA, London, UK

CIRIA - Construction Industry Research and Information Association. (2007). The SUDS Manual. London, UK. <http://www.ciria.org.uk/suds/publications.htm> (Último acceso: 25 de enero de 2011)

Coombes, P.J. and Mitchell V.G. (2006). Roofwater, storm water, and wastewater reuse. In T.H.F. Wong (ed.) *Australian runoff quality*. The Institution of Engineers Australia, Sydney, Australia.

CRWA – Charles River Watershed Association. (2008). Blackstone Town Hall Demonstration Project Evaluation of Low Impact Development (LID) Best Management Practices (BMPs) Opportunities. [http://www.crwa.org/projects/blackstone/lid\\_evaluation.pdf](http://www.crwa.org/projects/blackstone/lid_evaluation.pdf) (ultimo acceso: 02 de mayo de 2011)

Delgado M., Herrera F., Herrera-Viedma E and Martinez L. (1998). Combining numerical and linguistic information in group decision making, *Journal of Information Sciences* 107 (1998), pp. 177–194. Abstract | PDF (829 K) | View Record in Scopus | Cited By in Scopus (122) Delleur J. (2003). *The evolution of urban hydrology: past, present and future*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129 (8): 563-573

Devore J. (2006). *Probabilidad y Estadística para ingeniería y ciencias*. 6ed, International Thomson Editores, México DF. ISBN 0-534-39933-9

Dirección de Recursos Físicos. (2010). Presentación: Reciclaje de aguas lluvias y grises en la Universidad Javeriana.

Doumpos M., Zopounidis C. (1998). A Multicriteria Decision Aid Methodology for Sorting Decision Problems: The Case of Financial Distress. *Computational Economics*, (14), 197–218

Doumpos M., Zopounidis C. (2004). *Multicriteria Decision Aid Classification Methods*. Nueva York: Kluwer Academic Publishers

Durrans R. (2003). *Stormwater conveyance modeling and desing*. 1ed, Haestad Methods, Inc., USA. ISBN 0-965-75808-7

EAAB- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2005). *Estudio y Revisión de la curvas IDF y del Análisis Espacial de la Tormentas Curvas PADF para la sabana de Bogotá – Anexo E*

EAAB- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2011). *Tarifas. MN&A –* <http://www.acueducto.com.co> (Último acceso: 23 de abril de 2011)

Eder G., Duckstein L., Nachtnebel HP. (1997). Ranking water resource projects and evaluating criteria by multicriterion Q-analysis: an Austrian case study. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 6(5):259–271

EPA - Environmental Protection Agency. (2004). *Storm Water Management Technology Fact: Bioretention*. Estados Unidos <http://www.epa.gov/npdes/pubs/biortn.pdf> (Último acceso: 25 de enero del 2011)

EPA - Environmental Protection Agency. (2004b).. *Storm Water Management Technology Fact: Storm Water Wetlands*. Estados Unidos <http://www.epa.gov/owm/mtb/wetlands.pdf>

EU – European Union, (1998). Council Directive 98/83/EC (1998). Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption. *Official Journal of the European Communities*, L330/45, 05/12/1998.

Estupiñán J. y Zapata H. (2010). *Requerimientos de Infraestructura para el Aprovechamiento Sostenible del Agua Lluvia en el Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá*. Trabajo de grado, Magister en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Estupiñán J., Torres O., Torres A. y Zapata H. (2011) "Campañas de medición de calidad del agua lluvia en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana sede Bogotá: análisis estadístico y selección de ensayos como estrategia para optimizar tiempo y costos." En: Colombia. 2011. Evento: XIX Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología Ponencia: Campañas de medición de calidad del agua lluvia en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana sede Bogotá: análisis estadístico y selección de ensayos como estrategia para optimizar tiempo y costos.

Fernández B. (2005). Centro de Aguas Urbanas. <http://www.centroaguasurbanas.cl/> (Último acceso: 09 de febrero de 2011)

Fewkes A., Butler D. (2000). *Simulating the performance of rainwater collection and reuse systems using behavioural models*. *Building Services Engineering Research & Technology*, 2000, 21 (2): 99-106.

- Figueira J., Mousseau V., Roy B. (2005). ELECTRE methods. En: *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, J. Figueira, G. Salvatore, M. Ehrgott (eds.), Springer Science + Business Media, Inc., Boston, pp133–162
- Figueira J., Greco S., Roy B. (2009). ELECTRE methods with interaction between criteria: An extension of the concordance index. *European Journal of Operational Research*, 199 (2009) 478–495.
- Galarza Molina S.L., Torres A. Méndez Fajardo S., Pérez B. (2011). Herramienta de Análisis Multi-Criterio como Soporte para el Diseño del Programa Social de la Facultad de Ingeniería. *Revista Estudios Gerenciales*, 2011, 26 p. (Sometido)
- Galvis A., Cardona D. A. y Bernal D. P. (2005). Modelo conceptual de la selección de tecnología para el control de la contaminación por aguas residuales domesticas en localidades colombianas menores a 30.000 habitantes, Seltar. Conferencia Internacional Agua 2005: De la Acción Local a las Metas Globales. Santiago de Cali, Colombia, 2005, p. 1-10
- Galvis A., Vargas V. (2005). *Selección de tecnología de tratamiento de agua para consumo humano*. Perú. Evento: Simposio internacional de tecnologías alternativas en agua y saneamiento para pequeñas localidades. Ponencia.
- Gershon M., Duckstein L. (1983). Multiobjective approaches to river basin planning. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 109(1):13–28
- Gilat A. (2005). *Matlab® Una introducción con ejemplos básicos*. 1ed, Reverté, España, ISBN 84-291-5035-8
- González J. y Cotos J. (2005). *Sistemas de información medioambiental*. 1ed, GESbibli, S.L., España, ISBN 84-9745-056-6
- Google. (2010). Google Maps. Estados Unidos. <http://maps.google.es/> (Último acceso: 01 de septiembre del 2010)
- Greenland, S. (2001). Sensitivity analysis, Monte Carlo risk analysis, and Bayesian uncertainty assessment. *Risk Anal* 2001, 21(4):579-583.
- Grote G. (2009). *Management of Uncertainty*. Springer-Verlag. London, England. ISBN 978-1-84882-372-3
- Hajkowicz S., Higgins A. (2006). A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management. *European Journal of Operational Research*, 184 (2008) 255–265.
- Hajkowicz S., Collins K. (2006). A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management. *Water Resour Manage*, 21:1553–1566



Hammonds, J.S., Hoffman, F.O., & Bartell, S.M. (1994). An introductory guide to uncertainty analysis in environmental and health risk assessment. Environmental Restoration Program, Oak Ridge National Laboratory. ES/ER/TM-35/RI.

Hamouda M. A., Anderson W. B. y Huck P. M. (2009). Decision support systems in water and wastewater treatment process selection and design: a review. *Journal Water Science and Technology*, (60) 7:1757-1770

Hatt B.E., Deletic A., Fletcher T.D. (2006). A review of integrated storm water treatment and re-use in Australia. *Journal of Environmental Management*, 76:102–113.

Howard AF. (1991). A critical look at multiple criteria decision making techniques with reference to forestry applications. *Canadian Journal of Forest Research*, (21):1649–1659

Interpave. (2008). Guide to the Design, Construction and Maintenance of Concrete Permeable Pavments. Interpave, Leicester, UK.

Instituto de Pesquisas Hidráulicas. (1999) Area de Download. [En línea]. Brasil, Portable document format. [www.iph.ufrgs.br/grad/disciplinas/dhh/iph01014/pavimentos](http://www.iph.ufrgs.br/grad/disciplinas/dhh/iph01014/pavimentos) .PDF (Último acceso: 16 de febrero de 2005)

Kadlec R., Robert H., Wallace S. (2009). Treatment Wetlands. 2nd edn, CRC Press - Taylor and Francis Group, Boca Raton, USA. ISBN 978-1-56670-526-4.

Lai YJ., Liu TY., Hwang CL. (1994). TOPSIS for MODM. *European Journal of Operational Research* 76(3):486–500

Lara Borrero J., Quijano Nieto J., Riveros D., Torres Abello A., Forero Lunal C. (2004). *Optimización de sistemas expertos de apoyo a la toma de decisiones multicriterio Puerto Rico*. Evento: XXIX Congreso de la asociación interamericana de ingeniería sanitaria y ambiental (AIDIS2004) Ponencia.

Lara Borrero J.A., Torres Abello A.E., Campos Pinilla M.C., Duarte Castro L., Echeverri Robayo J.I., Villegas González P.A. (2007). *Aprovechamiento del agua lluvia para riego y para el lavado de zonas duras y fachadas en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá)*. Ingeniería y Universidad, 11(2), 193-202. ISSN 2011-2769.

López C. (2009). Elementos de Diseño para Acueductos y Alcantarillados. 2ed. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia. ISBN 958-8060-36-2

Makropoulos C.K., Natsis K., Liu S., Mittas K. y Butler D. (2008). Decision support for sustainable option selection in integrated urban water management. *Journal of Environmental Modelling & Software*, (23) 1448–1460

Martin C., Ruperd Y., Legret M. (2007). Urban stormwater drainage management: The development of a multicriteria decision aid approach for best management practices. *European Journal of Operational Research* (181) 338–349

Mathworks. (2011). Mathworks Accelerating the pace of engineering and science. <http://www.mathworks.com/products/matlab/description1.html>. (Último acceso: 8 de julio de 2011)

Mccarthy D., Deletic A., Mitchell V., Fletcher T., Diaper C. (2008). *Uncertainties in stormwater E.coli levels*. *Water Research*, 42 (no. 6-7): 1812-1824. DOI: 10.1016/j.watres.2007.11.009.

Michel S. (2003). *THE U.S.-MEXICAN BORDER ENVIRONMENT- Binational Water Management Planning*. San Diego: San Diego State University Press

Mitchell V.G., McCarthy D.T., Deletic A., Fletcher T.D. (2008). *Urban stormwater harvesting -sensitivity of a storage behaviour model*. *Environmental Modelling & Software*, 23 (2008) 782-793.

Mitchell V.G., McCarthy D.T., Fletcher T.D., Deletic A. (2005). *Optimising storage capacity for stormwater utilisation*. International Conference on Urban Drainage, Copenhagen, Denmark.

Mitchell V.G., McMahon T.A., Mein R.G. (2003). *Components of the total water balance of an urban catchment*. *Environ. Manage.* 32:735–746.

Ministerio de Salud República de Colombia. (1984). Decreto 1594. Usos del agua y residuos líquidos. pp. 1-52.

MINVU – Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (1999). *Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en Sectores urbanos*. Guía de Diseño. "Diario Oficial" N°35.713, Santiago de Chile, Chile.

MN&A - Mario Noriega & Asociados Ltda. – Arquitectos/Urbanistas. (2010). Plan maestro y de desarrollo urbanístico y arquitectónico de la planta física de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá - Resumen Ejecutivo Informe Final. [http://www.javeriana.edu.co/df/PUJ\\_plan\\_maestro\\_ene27\\_2010.pdf](http://www.javeriana.edu.co/df/PUJ_plan_maestro_ene27_2010.pdf) (Último acceso: 04 de marzo de 2011)

Montoya Araújo F., Suárez Esparragoza G. (1987). *Diseño de un sistema de recolección y almacenamiento de aguas lluvias para la población de Moñitos-Córdoba*. Trabajo de grado, Ingeniería Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Moura P. (2008). *Méthode d'évaluation des performances de systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain*. Thèse pour obtenir le grade de docteur, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, France.

NEERI - National Environmental Engineering Research Institute y UNICEF - United Nations Children's Fund. (2007). *Greywater Reuse In Rural Schools - Guidance Manual*. <http://www.washenesuelas.org/toolkit/documentos/instalaciones-de-agua/10-geywater-in-schools/index.html> (Último acceso: 18 de mayo de 2011)

Ozelkan EC., Duckstein L. (1996). Analysing water resource alternatives and handling criteria by multi criterion decision techniques. *Journal of Environmental Management*, 48:69–96

Pérez R. (2005). Agua, desagües y gas para edificaciones diseño y construcción. 5 ed, Ecoe Ediciones, Bogotá, Colombia. ISBN 958-648-393-2.

Pino Mosquera J., Rodríguez Valencia E. (1997). *Análisis de factibilidad para el almacenamiento y aprovechamiento de aguas lluvias en zona de ladera*. Trabajo de grado, Ingeniería Civil, Universidad de Valle, Santiago de Cali, Colombia

PGCo - Prince George's County. (2009). The bioretention manual. Department of Environmental Resources, Prince George's County, Maryland, USA. [http://www.mde.state.md.us/programs/Water/StormwaterManagementProgram/MarylandStormwaterDesignManual/Pages/programs/waterprograms/sedimentandstormwater/stormwater\\_design/index.aspx](http://www.mde.state.md.us/programs/Water/StormwaterManagementProgram/MarylandStormwaterDesignManual/Pages/programs/waterprograms/sedimentandstormwater/stormwater_design/index.aspx) (Último acceso: 22 de abril de 2011)

Poulter, S. R. (1998). Monte Carlo simulation in environmental risk assessment - science, policy and legal issues. *Risk: Health, Safety & Environment*, 9, 7-26.

RAC - Resource Assessment Commission. (1992). *Multi-Criteria Analysis as a Resource Assessment Tool*. Canberra: Resource Assessment Commission, Australia.

Resource Assessment Commission (1992) *Multi-Criteria Analysis as a Resource Assessment Tool*, Research. Paper No. 6, March, Resource Assessment Commission, Canberra, Australia

Restrepo Tarquino I., Galvis Castaño G. (1995). *Modelo para la optimización de inversiones en abastecimiento de agua y saneamiento en la zona rural del municipio de Cali*. Trabajo de grado, Maestría en Ingeniería de Sistemas, Universidad de Valle, Santiago de Cali, Colombia.

Rodríguez M., González A., Bellver C. (1999). Campos electromagnéticos. 2ed., Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, Sevilla, España. ISBN- 8447205401

Rojas Potes J., Madera Parra C. (2006). *Selección de tecnología para el tratamiento de agua residual municipal de la cabecera urbana el municipio de Caicedonia, Valle del Cauca*. Trabajo de grado, Ingeniería Sanitaria, Universidad de Valle, Santiago de Cali, Colombia.

Roy B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE). *la Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle (RIRO)*, (8):57–75

Roy B, Bertier B. (1971). *La méthode ELECTRE II: une méthode de classement en présence de critères multiples*, en : Nota de trabajo 142, Dirección científica. Paris: Grupo Metra.

Roy B. (2005). Paradigms and Challenges. En: *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, J. Figueira, G. Salvatore, M. Ehrgott (eds.), Springer Science + Business Media, Inc., Boston, pp. 3-5.

- Vargas Franco V., Galvis C. A. (1996). *Modelo de decisión para la selección de un sistema de tratamiento de agua con tecnología por filtración en múltiples etapas*. Trabajo de grado, Maestría en Ingeniería de Sistemas, Universidad de Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- Villegas P., Obregón N., Lara Borrero J., Méndez S., Vargas A. (2009) Herramienta informática como apoyo en la toma de decisiones en proyectos de agua y saneamiento en comunidades indígenas. Avances en recursos hidráulicos. [en línea] 2009; <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=145012892003>. ISSN 0121-5701 (Último acceso: 13 de junio de 2010)
- Saaty TL. (1987). The analytic hierarchy process – what it is and how it is used. *Math Model* 9:161–176
- Saaty TL. (2005). The analytic hierarchy and analytic network process for the measurement of intangible criteria and for decision making. En: *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*. Figueira J, Salvatore G, Ehrgott M (eds) Springer Science + Business Media, Inc., Boston, pp. 345–407
- Scott Wilson Pavement Engineering Ltd. (2006). Whole Life Cost Analysis for Various Pavement and Drainage Options. [http://www.paving.org.uk/research\\_and\\_case\\_studies.php](http://www.paving.org.uk/research_and_case_studies.php). (Último acceso: 06 de mayo de 2011)
- Sighn K., Chaudhuri. B. (2007). Matlab Programming. 1ed, Prentice-Hall, India, ISBN 978-81-203-3081-8
- Smith E. (2002). Uncertainty Analysis. In: *Encyclopedia of Environmetrics*. Wiley. 2002; Vol. 4: 2283-2297.
- Smith Q. R., Mesa S. O., Dyer R. I., Jaramillo A. P., Poveda J. G. y Valencia R. D. (2000). *Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbres*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín Facultad de Minas, Medellín.
- Schlüter W., Gillespie G. (2007). Forward thinking in greater Dublin: an example of SuDS as an integral part to planning application. NOVATECH 2007, *6th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management*. Lyon, France, 2007, p.181-188.
- Somes N., Potter M., Crosby J., Pfitzner M. (2007). Rain garden: design, construction and maintenance recommendations based on a review of existing systems. *13th International Rainwater Catchment Systems Conferences*. Sydney, Australia, 2007
- Srinivasa K, Duckstein L, Arondel C. (2001). Multicriterion Analysis for Sustainable Water Resources Planning: A Case Study in Spain. *Water Resources Management*. Vol. 14, pp. 435-456
- Torres O. (2011). *Identificación de los posibles usos del agua lluvia de escorrentía en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá*. Trabajo de grado, Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Topliceanu, L. (2007). Water resources engineering - analysis of uncertainty, In: Modelling and Optimization in the Machines Building Field (MOCM) 13, 2007, vol 1, pp.295-300.

Urbonas, B. 1999. Design of a Sand Filter for Water Quality Enhancement. Water Environment Research. Vol. 71, No. 1, pp. 102-113.

Uzoka F., Osuji J., Obot O. (2011). Clinical decision support system (DSS) in the diagnosis of malaria: A case comparison of two soft computing methodologies. Expert Systems with Applications, (38), 1537–1553

Warwick, J. J. (1997). "Use of first-order uncertainty analysis to optimize successful stream water quality simulation." J. Am. Water Resour. Assoc., 33(6), 1173–1185.

Weinhardt C. y Seifert S. (2009). Developments in GDN Research: Introduction. Group Decision and Negotiation. Vol 19, No.2, pp.107-109

Zeleny M. (1973) Compromise programming. En: Multiple criteria decision making. Cocharane JL., Zeleny M. (eds), University of Southern Carolina Press, Columbia, SC, pp262–301

Xu Z. (2005). A Method Based on IA Operator for Multiple Attribute Group Decision Making with Uncertain Linguistic Information. FSKD (1) pp 284-293