

EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE METODOLOGÍA MULTICRITERIO AL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO HÍDRICO DEL GRAN CÓRDOBA, R.A

Gonzalo G. Moya^a, Oscar R. Dölling^b, Erica B. Díaz^a, Andres Rodriguez^a

^a Laboratorio de Hidráulica, FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba. Bv Filloy S/N. Ciudad de Córdoba. Argentina. gmoya@com.uncor.edu, <http://www.efn.uncor.edu/investigacion/hidraulica/>

^b Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de San Juan, Ciudad de San Juan Argentina. <http://www.fi.unsj.edu.ar/departamentos/DptoCivil/>

Palabras Claves: Metodología Multicriterio, Optimización, Recursos Hídricos.

Resumen: El objetivo del presente trabajo es evaluar y actualizar los resultados alcanzados en la aplicación de la metodología multicriterio (Moya, 2004), para el análisis de los beneficios que surgen de aplicar alternativas estructurales y no estructurales al sistema de aprovechamiento de los recursos hídricos del Gran Córdoba, República Argentina. Este sistema se encuentra sometido a elevadas y crecientes demandas hídricas, combinadas a un riesgo en el deterioro de la calidad del recurso, lo cual genera diversos conflictos en los usos y prioridades del mismo.

Se plantea con el trabajo, analizar y optimizar la gestión de los recursos hídricos y las correspondientes inversiones en infraestructura, que brinden mayor confiabilidad al sistema, teniendo en consideración, las prioridades presentes y futuras entre los diversos usos concurrentes de manera de tender a un desarrollo sustentable. Para ello se aplicó un método de análisis multicriterio que permite evaluar alternativas, basándose en la cuantificación objetiva del comportamiento de las mismas, identificando aquella o aquellas más beneficiosas según los diversos criterios de análisis seleccionados, y establecer las ventajas comparativas de la adopción de cada una de ellas. Mediante un análisis de sensibilidad del esquema de valoración del método propuesto, se determinó que la alternativa recomendada presenta una elevada estabilidad ante la variabilidad actual y/o futura de las prioridades de uso entre los diferentes actores del recurso.

En todos los casos analizados se observó que una mejora en la capacidad de conducción y regulación, más una correcta programación de las tareas de mantenimiento de los actuales componentes del sistema, asegura el normal funcionamiento ante escenarios de sequía persistente futuras.

INTRODUCCIÓN

El fuerte crecimiento poblacional evidenciado en los últimos años en la ciudad de Córdoba y su zona de influencia, ha provocado conflictos en los usos y prioridades del recurso hídrico, siendo éstos últimos, la satisfacción de los requerimientos de agua potable, riego, aprovechamiento hidroeléctrico y uso recreativo.

La ciudad de Córdoba y su zona de influencia, denominada el Gran Córdoba, se encuentran comprendidas dentro de la región centro de la provincia homónima, perteneciente a la República Argentina, con una población de aproximadamente 1.300.000 habitantes en la capital y llegando a un total de 1.600.000 con su zona de influencia.

El abastecimiento de agua en la región se realiza principalmente de la cuenca del río Suquia, en la cual el almacenamiento de excedentes hídricos superficiales se realiza en el embalse San Roque. Esta fuente presenta un elevado grado de deterioro en su calidad debido al aportes de agua servida (muchas veces sin tratamiento) proveniente de poblaciones ubicadas aguas arriba.

El canal, Los Molinos-Córdoba, materializa el trasvase de agua desde la cuenca del río Xanaes y aporta al abastecimiento de gran parte de la zona Sur de la ciudad de Córdoba, tanto para agua potable como para riego.

Se observaron varios períodos plurianuales con sequías severas y extremas que alternan con períodos normales a húmedos, de manera cíclica. Los períodos de sequías más intensos y prolongados sucedieron en la segunda mitad de la década del '40 y a fines de la década del '60 a partir del cual existieron extensos períodos húmedos y muy húmedos. Desde la década del '80 existieron eventos de sequías aislados y menos severos. (Vicario, 2008)

La mayoría de los usos del recurso hídrico en el área del Gran Córdoba como agua potable, riego, turismo y en menor medida el aprovechamiento hidroeléctrico, son dependientes de los recursos hídricos superficiales, es por eso que el objetivo del presente trabajo es plantear la optimización de la gestión de los recursos hídricos y las inversiones en infraestructura, que brinden mayor confiabilidad al SRH (Sistema de Recursos Hídricos) y tiendan a un desarrollo sustentable considerando los esquemas de prioridades presentes entre diversos usos concurrentes.

La evaluación de las alternativas se lleva a cabo mediante un análisis comparativo, desarrollándose para ello una metodología multicriterio basada en la cuantificación objetiva del comportamiento de la cada alternativa seleccionada, identificando aquella o aquellas más beneficiosas según los diversos criterios de análisis seleccionados.

La [Figura 1](#) presenta un esquema de las poblaciones ubicadas dentro del área de influencia del Gran Córdoba, cuencas de aporte y sectores de riego abastecidos.

La Planta Potabilizadora la Calera abastece a las localidades de las Sierras Chicas a través de un acueducto hasta la ciudad de Unquillo. Aguas abajo del Azud El Diquecito, el río Suquia se encuentra con el dique nivelador Mal Paso que deriva parte del agua hacia el Canal Maestro Norte, y luego sigue su curso natural hasta interceptar al arroyo Saldán en la margen izquierda, y el arroyo La Cañada sobre la margen derecha.

El arroyo Saldán se encuentra regulado en uno de sus tributarios por el dique La Quebrada, el cual cumple las funciones específicas de control de crecidas y reserva de agua potable a la ciudad de Río Ceballos, además de ser uno de los principales atractivos turísticos de la región.

1.2 Descripción del Subsistema Xanaes

El subsistema Xanaes tiene por reservorio de agua al producido por el Embalse los Molinos generado por el cierre del dique homónimo. Aguas arriba de este último está ubicada la “torre de toma”, que alimenta la central hidroeléctrica N°1, desde allí el agua turbinada y las provenientes del dique Los Molinos, que es evacuada por los descargadores de fondo o vertedero, se unen en el Dique Compensador. En este último se encuentra la torre de toma para la Central Hidroeléctrica N°2.

El agua proveniente de la central y la transportada por el río Los Molinos, se encuentran en el Azud derivador de La Quintana, partir del cual se derivada hacia el Canal Los Molinos – Córdoba, para ser transportada hacia la ciudad de Córdoba, abasteciendo la planta potabilizadora Los Molinos y a la zona Sur del Cinturón Verde de dicha ciudad.

Los caudales que no han sido derivados en el azud derivador La Quintana, siguen por el curso natural del río Los Molinos para luego unirse con el río Anisacate y dar nacimiento el río Xanaes.

2 ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES Y NO ESTRUCTURALES

Entre las alternativas estructurales se analiza el impacto derivado del incremento de la capacidad de regulación del sistema (Presas de Cuesta Blanca y Anisacate); la mejora en la integración del SRH (conductos de interconexión Los Molinos-Suquia II), o bien la modificación del área de cobertura de los subsistemas (estación de bombeo Zona Noreste). Mientras que las alternativas no estructurales analizan los beneficios de las aplicaciones de políticas que alienten el uso racional de los recursos.

A continuación se describen las alternativas mencionadas:

- Proyecto dique Anisacate

El proyecto presa Anisacate plantea la construcción de un embalse para la regulación de los caudales drenados en la cuenca alta del río homónimo con una cuenca de aporte de 544,30 Km², y un modulo de 4,30 m³/s. El proyecto se completa con el Azud Derivador La Bolsa, el cual deriva el agua hacia el canal Anisacate, para su conducción hasta el Canal Los Molinos – Córdoba.

- Proyecto dique Cuesta Blanca

El proyecto presa Cuesta Blanca, tiene por objetivo regular los caudales provenientes de la cuenca alta del río San Antonio, asegurando el abastecimiento de agua potable a las poblaciones de Villa Carlos Paz, San Antonio de Arredondo, Mayu Sumaj, y otras localidades menores, las cuales poseen en la actualidad tomas directas sobre el río (sin regulación). Otra de las funciones de esta obra es la regulación de avenidas, a través de un volumen de reserva previsto en la obra.

- Conducto de interconexión Los Molinos – Suquia II

El subsistema Xanaes presenta, en relación al subsistema Suquia, una capacidad de almacenamiento y regulación potencialmente mayor (Ver [Tabla 1](#)), pudiendo eventualmente,

disminuir los requerimientos de volúmenes sobre el subsistema Suquia, sin comprometer sus reservas hídricas. Es por ellos que se analiza la alternativa de interconexión, que con capacidad de 1,50 m³/s, permitirá el trasvase de caudales entre las plantas potabilizadoras de la ciudad de Córdoba (Suquia II y Los Molinos), logrando una mejor integración dinámica, y equilibrando la oferta del recurso del sistema en su conjunto.

- Estación de bombeo zona Noreste

Tendiendo a una disminución de los requerimientos presentes sobre el subsistema Suquia, se plantea la construcción de una estación de bombeo con capacidad de 1 m³/s abastecida por la planta potabilizadora Los Molinos, que satisfaga los requerimientos de agua potable de gran parte de la zona Noreste de la ciudad de Córdoba, actualmente abastecida por la planta potabilizadora Suquia II. Esta capacidad es establecida de acuerdo al programa de inversión de la empresa concesionaria del servicio de agua potable en la ciudad de Córdoba.

En el [Tabla 1](#) se presenta un resumen de las características del SRH del Gran Córdoba y alternativas analizadas.

Subsistema	Cuenca (Km ²)	Reserva (Hm ³)	Módulo (m ³ /s)	Agua Potable (2008)		Riego (2004)	
				Poblac. (Hab)	Cons. (m3/s)	Superf. (Ha)	Cons. (m3/s)
Suquia	1350,0	190,5	10,9	896689	3,6	5923,0	1,9
Xanaes	978,0	307,0	10,3	448344	1,8	5384,0	1,5
La Quebrada	36,9	3,4	0,2	62637	0,3		
Anisacate	544,3	150,0	4,3				
Cuesta Blanca	460,0	34,8	3,7	63898	0,3		
SRH Actual	2364,9	500,9	21,4	1407670	5,7	11307,0	3,4
SRH Completo	3369,2	685,7	29,4	1471568	6,0	11307,0	3,4

Tabla 1: Características SRH del Gran Córdoba.

3 OFERTA Y DEMANDA

3.1 Caudales aportados al sistema

Las series de aportes a los embalses San Roque y Los Molinos, fueron extraídas de ([Castelló y otros, 2000](#)) y ([Moya, 2000](#)). Dichos trabajos generaron las series en base a registros obtenidos de DiPAS, AyEE y EPEC, todos ellos calculados a partir de un balance hídrico entre los registros de volúmenes erogados y la variación de reservas.

En el caso de los aportes a los embalses Cuesta Blanca, La Quebrada y Anisacate, éstos se obtuvieron de ([Moya, 2003](#)). En el primer caso, la serie se establece en base a un análisis estadístico, registrados en dicha cuenca en el período 1945-1976, con los aportes ocurridos en el embalse San Roque, mientras que en el caso de La Quebrada la serie fue establecida con un modelo de balance hídrico, según la metodología de Thornthwaite, que realiza un análisis comparativo de la ETP y ETR, conjuntamente con RU, cuyos parámetros se calibraron con registros de aportes existentes. Y los aportes al proyecto presa Anisacate se establecieron en base a los registros obtenidos de DiPAS y AyEE.

En la [Tabla 2](#) se realiza un resumen de las principales características estadísticas de las series de aportes en cada subsistema hídrico.

	SR	CB	LQ	LM	AN
Q_{Med}	7.44	3.73	0.21	10.26	4.57
Q_{Max}	54.72	27.08	0.87	89.80	43.00
Q_{Min}	0.00	0.04	0.00	0.10	0.11
σ^2	8.61	4.16	0.19	10.71	5.06
N	881.0	881.0	708.0	761.0	679.0

Tabla 2 Estadísticos series de aporte al SRH.

3.2 Caudales Demandados al Sistema

Los caudales demandados que producen un uso consuntivo del recurso, son tres: abastecimiento de agua potable, riego y caudal ecológico en los ríos Suquia y Xanaes. Mientras que la demanda hidroenergética, durante la ocurrencia de periodos secos, se realiza según los requerimientos de agua potable y riego.

En (Moya, 2000) se establecieron las series de caudales medios mensuales demandados en el sistema de riego de la ciudad de Córdoba para el periodo 1979-1997 en base a registros de mediciones diarias. Posterior a este periodo no se dispone de registros sistemáticos de caudales derivados al sector, pero de acuerdo a afirmaciones realizadas por usuarios y responsables del sector de riego, los caudales derivados “son los mismos” a los ocurridos históricamente. Por tal, considerando que la superficie regada es cada vez menor ya que en el año 2004 se riega aproximadamente solo un 40% de la superficie regada en el año 1987 (Moya, 2004) se concluye que existe una marcada y creciente ineficiencia en la aplicación de los caudales derivados.

Esto imposibilita establecer una evolución “racional” de los consumos, por lo cual y hasta que se disponga de mayor información se adopta que la demanda futura de agua de riego es igual a la media histórica (Tabla 3).

Mes	Canal Maestro de Riego	
	Norte	Sur
Ene	1,75	1,30
Feb	1,80	1,50
Mar	2,15	1,45
Abr	2,00	1,65
May	1,80	1,15
Jun	0,00	0,00
Jul	1,85	1,05
Ago	2,40	2,00
Sep	2,80	2,15
Oct	2,70	2,30
Nov	2,10	2,00
Dic	1,70	1,35

Tabla 3 Demanda de agua para riego en la ciudad de Córdoba.

En el caso de la demanda de agua potable, ésta es determinada por la población servida, la dotación media anual, y los coeficientes de variación estacional de consumos.

Para la generación de las series poblacionales se adoptaron los datos censales de los años 1980, 1991, 2001 y 2008. Los tres primeros se extrajeron de los censos nacionales que facilita el INDEC, mientras que el último se tomaron del censo Provincial 2008, ya que los datos del censo 2010, no se encuentran disponibles a la fecha. (Ver Tabla 4)

Se adopta que el crecimiento poblacional en el periodo 2001-2024 se realiza según una proyección aritmética según la ecuación (1).

$$P_i = \frac{P_{08} - P_{91}}{t_{08} - t_{91}} \times t_i + P_{08} \quad (1)$$

La tasa de crecimiento se adopta constante e igual a la registrada entre los años 1991 y 2001. Se establece de esta forma la población total en la ciudad de Córdoba en el periodo comprendido entre ene/1997 y dic/2022. En [Tabla 4](#) se resumen los datos poblacionales utilizados.

Descripción	Censo 1980	Censo 1991	Censo 2001	Censo 2008
Ciudad de Córdoba	970024	1157507	1267774	1301572
Resto del Gran Córdoba	17114	24150	36820	52516
Cuenca del Dique La Quebrada	26125	36714	50560	62637
Cuenca del San Antonio	29655	43009	60318	63898
Resto de la Cuenca Alta	46481	57729	69121	76364
Total Población Afectada	1089399	1319109	1484593	1556987

Tabla 4 Población abastecida por subsistemas del SRH del Gran Córdoba

Para la determinación de la dotación y sus coeficientes de distribución se utiliza los datos recabados de producción total de agua potable y población abastecida en cada uno de los subsistemas del SRH del Gran Córdoba.

El cálculo de la serie de coeficientes de distribución mensual se realiza dividiendo al valor de dotación media mensual, por el valor medio anual ([Tabla 5](#)).

Mes	Subsistema		
	C. de Córdoba	Cuesta Blanca	La Quebr.
Ene	1.06	1.15	1.15
Feb	1.10	1.10	1.08
Mar	1.04	1.05	1.01
Abr	0.98	1.00	0.95
May	0.95	0.85	0.88
Jun	0.92	0.85	0.81
Jul	0.92	0.85	0.88
Ago	0.96	0.95	0.95
Sep	1.00	1.05	1.01
Oct	1.00	1.05	1.05
Nov	1.02	1.05	1.08
Dic	1.05	1.10	1.11

Tabla 5: Coeficiente de variación mensual por subsistemas

Las dotaciones históricas se usó, para la ciudad de Córdoba y localidades abastecidas por la planta La Quebrada, el valor registrado en la actualidad, mientras que para las demás localidades se adoptó el valor de referencia establecido en ([AyEE, 1986](#)). Ver [Tabla 6](#).

Región	Dotación		C _{VE}
	Hist.	Fut.	
CBA	330	330	Ciudad de Córdoba
Pta. La Calera			
La Quebrada	200	200	Planta La Quebrada
Cuenca del R. San Antonio	500	400	Planta Cuesta Blanca
Resto Cuenca San Roque	500	500	

Tabla 6: Dotación de agua potable por subsistemas

4 COSTOS DE LAS ALTERNATIVAS

La evaluación económica de proyectos analiza los costos y beneficios económicos generados por el desarrollo de una nueva política de inversión y/o gestión, asistiendo al estudio de la conveniencia de llevarlos a cabo.

En el presente trabajo se realizó para cada una de las alternativas analizadas, la evaluación económica desde una perspectiva privado-gubernamental, identificando los costos de construcción, mantenimiento y operación, de las obras, entes de producción y distribución de agua potable y/o riego.

No se analizan los costos y beneficios sociales de un determinado proyecto de inversión y/o gestión del recurso ya que se considera que las reducciones en los consumos no impactan en el bienestar social, para el caso de agua potable, o bien no modifican los rendimientos agrícolas en el uso de agua para riego.

Cada alternativa plantea en el tiempo una serie de inversiones y/o desembolso de recursos económicos destinados a alcanzar los objetivos originalmente planteados. De esta forma, y con el objetivo de llevar a cabo análisis comparativos de los costos operativos y de inversión a liquidar dentro del horizonte de planificación, se calculó para cada alternativa el Valor Presente Neto (VPN) de los desembolsos futuros.

El VPN es definido como el “Valor actual de los flujos futuros de efectivo descontados a la tasa de descuento apropiada”, y se calcula mediante la ecuación.

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{C_T}{(1+S)^t} \quad (2)$$

En (Moya, 2005) se encuentran un análisis detallado del VPN de cada una de las alternativas. En [Tabla 7: Costos por Alternativa \(VPN\)](#). se resumen los resultados obtenidos del análisis de costos a la fecha.

Alternativa	VPN [U\$]
Alternativa: A0_SC	\$ 79,261,881.73
Alternativa: A0_CC	\$ 162,895,161.33
Alternativa: A1_SC	\$ 187,878,245.74
Alternativa: A1_CC	\$ 271,511,525.34
Alternativa: A2_SC	\$ 137,746,459.20
Alternativa: A2_CC	\$ 221,379,738.80
Alternativa: A3_SC	\$ 246,362,823.20
Alternativa: A3_CC	\$ 329,996,102.80
Alternativa: A4_SC	\$ 89,328,570.12
Alternativa: A4_CC	\$ 172,961,849.72
Alternativa: 5_CC.a	\$ 200,670,973.07
Alternativa: A5_CC.b	\$ 211,967,135.32

Alternativa: A5_CC.c	\$ 221,932,917.41
Alternativa: A5_CC.d	\$ 237,382,421.86
Alternativa: A5_CC.e	\$ 243,366,851.09
Alternativa: A6_CC	\$ 186,358,575.06

Tabla 7: Costos por Alternativa (VPN).

5 ESCENARIOS DE APORTES MODELADOS

Para determinar los periodos de los cuales se extraerán las series que serán aplicadas para la modelación del sistema se ha realizado un balance hídrico entre la oferta hídrica del subsistema Suquia (principal recurso del sistema) y las demandas.

$$V_i = V_{SR} - \sum_{t=0}^{t=\Delta t} V_A - V_D \quad (3)$$

Las demandas incluyen al agua potable, riego y caudal ecológico. En el caso de las ofertas hídricas, son aquellas provenientes de los aportes a los embalses San Roque y se considera los volúmenes acumulados en Δt 1, 2, 5, 10, 15 y 20 años, permitiendo conocer la existencia de periodos críticos menores de falla dentro de un horizonte de planificación a mediano plazo (20 años). Se define la falla del sistema cuando V_i es menor que cero, siendo este valor igual al volumen de agua demandado no satisfecho.

Para establecer el periodo más crítico de aportes se consideran los máximos déficit en el subsistema Suquia y su duración, la cual brinda una idea de la presión a la que está sometido para satisfacer las demandas con la ocurrencia de un déficit en la oferta. Los resultados obtenidos se presentan en [Tabla 8](#) y [Figura 2](#).

De los resultados obtenidos en el se concluye que los dos periodos de aportes mínimos se encuentran representados por las series de 20 años que abarcan los periodos Ene/1941 a Dic/1960 y Ene/1953 a Dic/1972.

Periodo	Inicio	Final	Duración	Mínimo Aporte	Def. Hidr. Sub. Suquia	
					Máximo	Promedio
1 año	May-51	Nov-51	7	Nov-51	45.50	15.28
2 años	Sep-36	Sep-39	37	Dic-38	154.83	154.83
	Mar-49	Dic-52	46	Nov-51	224.56	224.56
	Jun-70	Oct-72	29	Dic-70	124.53	124.53
5 años	Dic-36	Feb-43	75	Sep-39	418.77	418.77
	Oct-49	May-56	80	Nov-51	525.73	525.73
	Mar-69	Abr-73	50	Oct-72	291.68	291.68
10 años	Oct-38	Sep-39	12	Dic-38	100.16	100.16
	Nov-40	Oct-44	48	Feb-43	455.78	455.78
	Jun-50	Dic-58	103	Dic-54	772.66	772.66
	Abr-69	Feb-75	71	Mar-72	481.11	481.11
15 años	Dic-46	Nov-56	120	Nov-51	513.34	513.34
	Oct-59	Nov-61	26	Dic-59	313.97	313.97
	Dic-71	May-73	18	Ago-72	249.13	249.13
	Dic-73	Feb-75	15	Nov-74	148.27	148.27
	Mar-76	Dic-76	10	Oct-76	154.97	154.97
20 años	Ago-50	Nov-57	88	Nov-57	708.18	708.18
	Oct-64	Oct-68	49	Dic-65	284.62	284.62

Tabla 8: Periodos de déficit máximos calculados en el sistema de aprovechamiento.

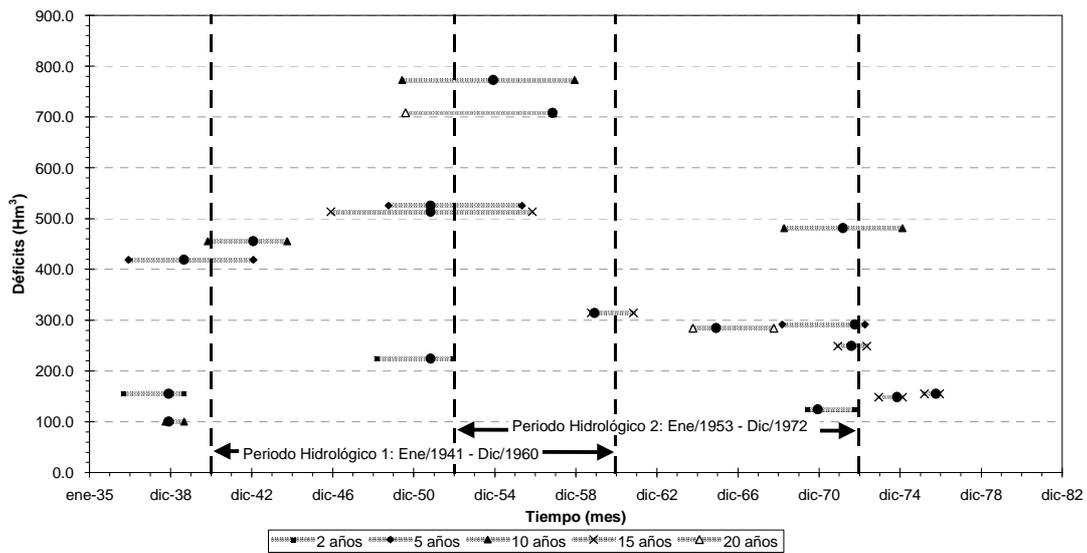


Figura 2: Periodos de aportes mínimos al subsistema Suquia

Alt. Estructurales de Interc. y NoAlt. Estr. de Reg. e Interc. Estructurales	A ₀ -SC:	Sistema Actual, sin conducto de interconexión Los Molinos – Suquia
	A ₀ -CC:	Sistema Actual, con conducto de interconexión Los Molinos – Suquia;
	A ₁ -SC:	Sistema Actual con presa Cuesta Blanca, sin conducto de interconexión Los Molinos – Suquia
	A ₁ -CC:	Sistema Actual con presa Cuesta Blanca, con conductos de interconexión Los Molinos – Suquia
	A ₂ -SC:	Sistema Actual con presa Anisacate, sin conducto de interconexión Los Molinos – Suquia
	A ₂ -CC:	Sistema Actual con presas Anisacate, con conducto de interconexión Los Molinos – Suquia
	A ₃ -SC:	Sistema Actual con presas Cuesta Blanca y Anisacate, sin conducto de interconexión Los Molinos – Suquia
	A ₃ -CC:	Sistema Actual con presas Cuesta Blanca y Anisacate, con conductos de interconexión Los Molinos – Suquia
	A ₄ -SC:	Sistema Actual con Azud La Bolsa, sin conducto de interconexión Los Molinos – Suquia
	A ₄ -CC:	Sistema Actual con Azud La Bolsa, con conducto de interconexión Los Molinos – Suquia
	A ₅ -CC.a	Sistema Actual con Presa Cuesta Blanca (5 Hm ³) – Demanda 100% con conducto de interconexión Los Molinos – Suquia
	A ₅ -CC.b	Sistema Actual con Presa Cuesta Blanca (5 Hm ³) – Demanda 95% con conducto de interconexión Los Molinos – Suquia
	A ₅ -CC.c	Sistema Actual con Presa Cuesta Blanca (5 Hm ³) – Demanda 90% con conducto de interconexión Los Molinos – Suquia
	A ₅ -CC.d	Sistema Actual con Presa Cuesta Blanca (5 Hm ³) – Demanda 85% con conducto de interconexión Los Molinos – Suquia
	A ₅ -CC.e	Sistema Actual con Presa Cuesta Blanca (5 Hm ³) – Demanda 75% con conducto de interconexión Los Molinos – Suquia
	A ₆ -CC	Sistema Actual con Presa Cuesta Blanca (5 Hm ³) – Demanda 75% y estación de bombeo Noreste (1 m ³ /s);

Tabla 9: Alternativas simuladas del SRH del Gran Córdoba

6 OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA

Las alternativas estructurales del sistema de aprovechamiento incluyen obras de almacenamiento, derivación y conducción. Se analiza también los beneficios de nuevas y mejores políticas de consumo y gestión del recurso. En el [Tabla 9](#) se resumen las alternativas consideradas.

7 RESULTADOS - METODOLOGÍA MULTICRITERIO

En total se han realizado 32 simulaciones del sistema de aprovechamiento, las cuales consideraron 7 configuraciones distintas, 1 conducto de interconexión, 5 niveles de demanda y 2 series hidrológicas. Las distintas configuraciones consideran al sistema actual incrementado en su capacidad de regulación por las presas de Cuesta Blanca y Anisacate, o bien modificando el área de afectación de los subsistemas en la ciudad de Córdoba mediante una estación de bombeo de agua potable.

Para el desarrollo del presente trabajo se aplicó el modelo Acres Reservoir Simulation Package BOSS ARSP™ (<http://www.bossintl.com/index.html>), (ARSP, 2000) y (Allen, 1986), el cual permite en función de las características físicas del sistema de embalses, del escenario de oferta y demanda de agua, y una estructura de prioridades de uso, optimizar la distribución del recurso hídrico minimizando los costos relativos derivados de la no-satisfacción de una demanda establecida.

Por lo tanto para la correcta modelación de cada componente conjuntamente con su funcionamiento y capacidad, es necesario incluir una serie de reglas de operación que lo gobiernen. Estas reglas de operación son establecidas en función del siguiente esquema de prioridades de uso del recurso para los distintos aprovechamientos:

- Agua Potable;
- Volumen Embalsado;
- Riego y
- Caudal Ecológico.

Este esquema de prioridades se materializa en el modelo de optimización mediante una serie de penalidades que impactan sobre los volúmenes derivados y en reserva, tendiendo el modelo de optimización a minimizar el costo total del uso del recurso. Para la calibración del esquema de penalidades del modelo simulación, éstas fueron modificadas por aproximaciones sucesivas hasta llegar a obtener para cada alternativa el máximo beneficio según la metodología multicriterio y el esquema de valor.

Sobre SRH del Gran Córdoba concurren variadas demandas de consumo, calidad y recreación, para las cuales es necesario cuantificar objetivamente el comportamiento de la alternativa seleccionada, identificando aquella o aquellas más beneficiosas. Para su resolución se aplicó un modelo de decisión basado en la técnica de optimización multicriterio, el cual se encuentra fundamentado en el análisis jerárquico de las alternativas seleccionadas, procurando desarrollar para cada una de ellas un juicio de valor objetivo.

Para establecer el valor de cada alternativa se recurre sintéticamente a la siguiente metodología:

Se evalúa el “Comportamiento del Componente” del sistema mediante un juicio de valor que considera aspectos tales como reservas disponibles en el sistema, satisfacción de las demandas (agua potable y/o riego), caudales ecológicos, etc.

Se definen los rangos de comportamiento de cada elemento y/o componente y la frecuencia de ocurrencia de eventos ocurridos dentro de cada uno de ellos. En el caso de los componentes representativos de los embalses y cauces naturales, los rangos se establecen según los niveles y/o caudales máximos, mínimos o normales que contemplen aspectos de

calidad, recreación y generación energética entre otros. En el caso de las demandas de agua potable y/o riego, los rangos se establecen considerando su grado de satisfacción.

En la [Tabla 10](#) se presentan los rangos de análisis que permiten caracterizar el comportamiento de cada componente.

Aprovechamiento	Restricciones			
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Volumen Embalse	100%-75% VT	75%-50% VT	50%-25% VT	<25% VT
Agua Potable	100%-95% DAP	95%-75% DAP	75%-50% DAP	<50% DAP
Riego	100%-95% DAR	95%-75% DAR	75%-50% DAR	<50% DAR
Caudal Ecológico	100% Qm	100%-30% Qm	30%-10% Qm	<10%Qm

Tabla 10: Rangos de niveles y caudales para el análisis de resultados de la modelación

CME: Capacidad Máxima de Embalse.

DAP/DAR: Demanda de Agua Potable/Riego.

QE: Caudal Ecológico.

Posteriormente la valoración del Comportamiento del Componente se efectúa mediante un esquema de valoración individual que contempla el grado deseado de satisfacción de cada elemento respecto de las demandas operantes. Dado que cada criterio de análisis contiene distintos elementos componentes, se plantea una valoración relativa que permite considerar la importancia entre ellos.

Finalmente, y considerando las prioridades adoptadas en el sistema, se puntúa la importancia relativa entre los diversos criterios analizados, lo cual permite establecer el “Beneficio de la Alternativa Seleccionada”

7.1 Valoración del comportamiento de los componentes del sistema

Los criterios de análisis, los elementos componentes y los esquemas de valoración propuestos, se presentan en la [Tabla 11](#). Según lo anterior se ha definiendo a λ_{kji} como el valor asignado al comportamiento del componente i de la alternativa j perteneciente al criterio k .

- Valoración de componente del sistema

Cada criterio de análisis se encuentra compuesto por varios elementos componentes, los cuales presentan distinta valoración relativa entre ellos, dependiendo sus usos e importancia del sistema de aprovechamiento. Este factor es representado mediante el coeficiente C_{ki} , definido como el valor de la componente i perteneciente al criterio k , siendo c_{ki} el valor de C_{ki} adimensionalizado por la sumatoria de los valores de los n componentes del criterio.

$$c_{ki} = \frac{C_{ki}}{\sum_{i=1}^n C_{ki}} \quad (4)$$

Posteriormente se define como Utilidad del Criterio (U_{kj}) como el resultado del comportamiento de cada componente (λ_{kji}) ponderado por su importancia relativa (c_{ki}) dentro del criterio de análisis.

Matemáticamente:

$$U_{ki} = \sum_{i=1}^n c_{kj} \times \lambda_{kji} \quad (5)$$

siendo u_{kj} la utilidad adimensional.

$$u_{kj} = \frac{U_{kj}}{\sum_{j=1}^m U_{kj}} \tag{6}$$

m: número de alternativas analizadas.

- Valoración del criterio

Tal como se ha indicado previamente en el SRH existen diversos criterios que coexisten simultáneamente, tales como la disponibilidad de agua potable y riego, volúmenes embalsados, incluyendo particularidades tales como reservas del sistema, calidad del agua embalsada, turismo, etc., los cuales distintos grados de importancia relativa. En general estos criterios o usos, conjuntamente con sus beneficiarios, compiten entre sí en busca de su mayor provecho, siendo función exclusiva del planificador establecer un equilibrio que lleve al uso racional del recurso.

Esta valoración se define a partir del parámetro v_k siendo este el valor del criterio k, siendo B_j el beneficio de la alternativa j.

$$B_j = \sum_{k=1}^l v_k \times u_{kj} \tag{7}$$

En la **Tabla 11** se resume el esquema de valoración adoptado para cada una de las variables analizadas.

Criterio	v_k	Componente	C_{ki}	λ_{kij}				
				10	8	6	3	0
Volumen Embalsado	8	San Roque	10	Z1: 100%	Z2 < 5%	Z2 > 5% y Z3: 0%	Z3 ≠ 0% y Z4: 0%	Z4 ≠ 0%
		Los Molinos	8					
		La Quebrada	7					
Agua Potable	10	Cdad, De Córdoba	10	Z1: 100%				Z1 ≠ 100%
		Resto G, Córdoba	10					
		Dpto, Punilla	10					
		Dpto, Colón	10					
Agua Riego	5	Canal M, Norte	10	Z1: 100%	Z2 < 25%	Z2 > 25% y Z3: 0%	Z3 ≠ 0% y Z4: 0%	Z4 ≠ 0%
		Canal M, Sur	10					
Caudal Ecológico	5	R, Suquia Córdoba	10	Z1: 100%	Z2 < 50%	Z2 > 50% y Z3: 0%	Z3 ≠ 0% y Z4: 0%	Z4 ≠ 0%
		R, Los Molinos	8					
		R, Saldán	8					
		R, San Antonio	9					
Costo Alternativa	7							

Tabla 11: Resumen del esquema de valoración del SRH del Gran Córdoba,

Para el criterio “Costo Alternativa” el valor de u_{kj} es igual al costo de la alternativa adimensionalizado por la sumatoria de los costos de todas las alternativas.

- Análisis de sensibilidad

La metodología presentada se resume en establecer correctamente un único esquema de valoración, cuyo resultado dará un orden de preferencia de cada alternativa seleccionada. En la realidad todo esquema de valor es variable para cada usuario del sistema. Así mismo en el futuro es factible que para la sociedad, el esquema de valor adoptado se modifique, pasando a tener otras prioridades, tal vez distintas a las actuales. Por esta razón es útil realizar un análisis de sensibilidad de las variables, que considere un espectro factible de evolución del esquema de valoración planteado originalmente.

Considerando que B_j es función de las variables λ_{kji} , C_{ki} y v_k , que representan al esquema de valoración de la metodología multicriterio, el análisis de sensibilidad se realiza calculando los valores de B_j para distintos conjuntos de valores de λ_{kji} , C_{ki} y v_k .

$$B_j = f(\lambda_{kji}, C_{ki}, v_k) \quad (8)$$

$$\lambda_{kji} = (\lambda_{kij})_0 + Rnd_1 \times \sigma_1 \times (\lambda_{kij})_0 \quad (9)$$

$$C_{ki} = (C_{ki})_0 + Rnd_2 \times \sigma_2 \times (C_{ki})_0 \quad (10)$$

$$v_k = (v_k)_0 f + Rnd_3 \times \sigma_3 \times (v_k)_0 \quad (11)$$

En el caso de las desviaciones σ se consideran las siguientes.

Elemento	σ
Comportamiento	25% Todas;
Componente	0% Agua Potable;
	100% Restantes;
Criterio	100% Todas.

Tabla 12: Desviaciones por elemento.

Para que los resultados obtenidos cubran un amplio rango de combinaciones de las variables λ_{kji} , C_{ki} y v_k , se calcularon los valores de B_j para 10.000 combinaciones del esquema de valoración. En la [Tabla 13](#) se muestra el porcentual de oportunidades en que cada alternativa presenta un determinado orden de jerarquía, definiendo ésta como el grado de preferencia (B_j) de cada alternativa respecto de las demás.

Jerarquía	A0_SC	A0_CC	A1_SC	A1_CC	A2_SC	A2_CC	A3_SC	A3_CC	A4_SC	A4_CC	A5.a	A5.b	A5.c	A5.d	A5.e	A6
I	0.0	0.2	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	11.4	3.6	10.3	0.0	0.0	0.0	1.8	5.4	66.2
II	0.2	1.0	0.0	2.9	0.1	1.9	0.0	7.1	4.7	25.2	1.0	0.3	0.5	6.2	28.0	21.3
III	0.1	2.9	0.0	2.6	0.1	7.6	0.0	11.3	7.0	17.5	2.5	0.7	2.5	20.1	18.3	6.8
IV	0.2	4.5	0.0	7.2	0.3	11.1	0.0	8.9	5.4	15.0	2.6	1.3	9.3	18.3	12.6	3.7
V	0.3	5.4	0.0	8.6	0.3	14.3	0.0	8.5	5.0	10.4	5.0	3.1	12.8	15.2	10.4	1.0
VI	0.3	6.5	0.0	6.9	0.6	15.2	0.1	7.9	4.5	6.0	7.5	5.6	15.9	14.5	8.0	0.3
VII	0.3	8.3	0.0	10.7	0.8	10.1	0.2	5.5	5.0	4.8	9.8	10.7	16.5	12.7	4.2	0.2
VIII	0.4	9.0	0.0	10.3	1.0	7.2	0.4	4.0	4.0	2.7	13.8	12.9	24.4	5.3	4.0	0.2
IX	0.4	11.3	0.1	9.9	0.5	6.9	0.6	3.6	4.2	6.0	19.0	21.5	10.2	2.9	3.7	0.2
X	0.6	11.3	0.1	9.1	0.5	14.8	0.4	5.3	3.6	2.1	21.7	20.2	4.6	1.7	2.9	0.1
XI	1.2	27.4	0.2	12.8	0.5	9.8	0.3	10.4	7.6	0.0	10.8	14.1	2.0	0.7	1.9	0.0
XII	1.7	10.8	0.2	13.9	1.1	1.1	0.3	12.7	45.5	0.0	4.3	6.9	0.6	0.5	0.5	0.0
XIII	39.5	0.6	9.9	1.7	32.0	0.1	11.8	1.7	0.0	0.0	0.9	1.3	0.3	0.1	0.1	0.0
XIV	24.3	0.7	11.8	1.4	42.5	0.0	16.7	1.0	0.0	0.0	0.6	0.6	0.2	0.0	0.0	0.0
XV	10.5	0.2	55.8	0.5	16.6	0.0	15.6	0.3	0.0	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
XVI	20.1	0.1	21.9	0.3	3.1	0.0	53.6	0.2	0.0	0.0	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla 13: Análisis de sensibilidad de B_j. En Porcentaje

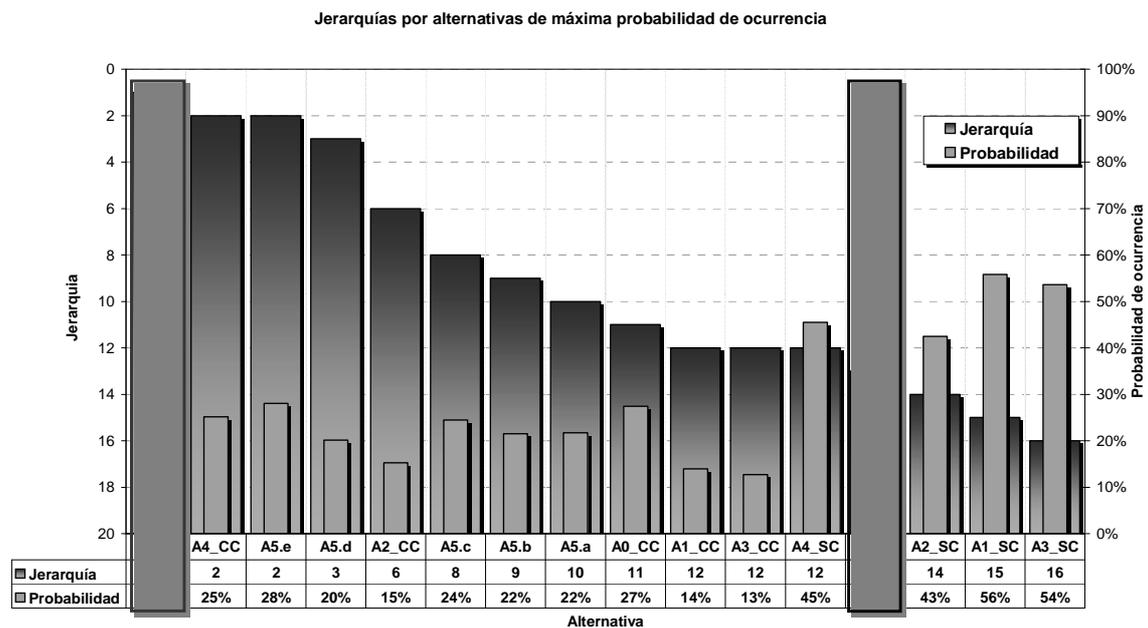


Figura 3: Jerarquías por alternativa y probabilidad de ocurrencia.

De la [Tabla 13](#) y [Figura 3](#) se observa que la alternativa A6_CC es la más conveniente, con un 66,2 y 21,3 en el primer y segundo orden de jerarquía, exhibiendo una elevada estabilidad frente a variaciones de las preferencias de la sociedad, siendo la más atractivas frente a las demás.

En la [Figura 3](#) se muestra que el sistema de aprovechamiento actual (A0_SC) se encuentra en el orden de preferencia 13° con una probabilidad del 40, mostrando la inconveniencia de mantenerlo en las condiciones actuales de aprovechamiento.

Según los resultados obtenidos, y tendiendo al uso racional y sustentable del recurso, se recomienda:

Generar políticas de gestión tendientes a reducir el consumo domiciliario y rural en un 25 respecto del actual;

Desarrollar un detallado programa de inversión para el mantenimiento y expansión de la infraestructura del SRH del Gran Córdoba, garantizando su funcionalidad y confiabilidad;

Ampliar en $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ la capacidad de producción de la planta potabilizadora Los Molinos y construir una estación elevadora, de igual capacidad, para abastecer la zona noreste de la ciudad de Córdoba;

Incrementar a $4 \text{ m}^3/\text{s}$ la capacidad de transporte del Canal Los Molinos – Córdoba, garantizando su funcionalidad y confiabilidad;

8 CONCLUSION

Se actualizó el esquema de funcionamiento de SRH desde el 2004 a la fecha y realizaron nuevamente 32 modelaciones, que consideran 7 configuraciones del sistema de aprovechamiento, una alternativa de interconexión y una modificación del área de cobertura de los subsistemas, generándose un esquema de prioridades de usos hídricos. Lo cual permitió que se identificaran eventuales insuficiencias en los sistemas de regulación, derivación y satisfacción de los requerimientos hídricos.

Se desarrollo Ad-hoc un método de análisis multicriterio que permite establecer las ventajas comparativas de la adopción de determinadas alternativa de aprovechamiento.

Mediante un análisis de sensibilidad del esquema de valoración del método multicriterio propuesto, se determinó que la alternativa recomendada nuevamente presenta una elevada estabilidad ante la variabilidad actual y/o futura de las prioridades de uso entre los diferentes actores del recurso.

Se observó que el sistema bajo su configuración actual, aún con un manejo óptimo se presenta como una de las peores alternativas de aprovechamiento del recurso.

En todos los casos analizados se observó que una mejora en la capacidad de conducción y regulación, más una correcta programación de las tareas de mantenimiento de los actuales componentes del sistema, simultáneamente con un mejor aprovechamiento integral del recurso, asegura el normal funcionamiento ante escenarios de sequía persistente.

Aún con estos resultados preliminares se evidencia la necesidad de continuar y profundizar estos estudios, para permitir la eficiente planificación de la gestión de los recursos hídricos y la consecuente programación de inversiones en infraestructura.

9 SIMBOLOGÍA

DiPAS: Dirección Provincial de Recursos Hídricos;
 AyEE: Agua y Energía Sociedad del Estado;
 EPEC: Empresa Provincial de Energía de Córdoba;
 SRH: Sistema de Recursos Hídricos;
 CMN: Canal maestro Norte;
 CMS: Canal maestro Sur;
 Q_{Med} : Caudal medio anual;
 Q_{Max} : Caudal máximo medio mensual;
 Q_{Min} : Caudal mínimo medio mensual;
 ETP: Evapotranspiración Potencial;
 ETP: Evapotranspiración Real;
 RU: Estado de humedad antecedente del suelo;
 σ^2 : Desviación estándar
 N: Número de datos;
 P_i : Población en el mes i ;
 P_{91} : Población según censo Ago/91;
 P_{01} : Población según censo Ago/01;
 t_{91} : Ago/91 ($t=0$).
 t_{01} : Ago/01 ($t=121$).
 t_i : mes i , contado a partir de t_{01} .
 V : Volumen balance (Hm^3);
 V_{SR} : Reserva a nivel de vertedero (Hm^3);
 V_A : Volumen anual aportado (Hm^3);
 V_D : Volumen anual demandado (Hm^3);
 Δt : Periodo temporal de análisis (años);
 i : Instante de tiempo analizado;
 λ_{kji} : Valor del comportamiento del componente i de la alternativa j perteneciente al criterio k ;
 C_{ki} : Valor de la componente i perteneciente al criterio k ;
 U_{kj} : Utilidad del criterio k de la alternativa j ;
 M : número de alternativas analizadas;
 v_k : Valor del criterio k ;
 B_j : Beneficio de la alternativa j ;
 C_t : Costo del Periodo t ;
 t : Periodo de análisis;
 n : N° total de periodos a analizar;

REFERENCIAS

- Allen, R.B. (1986) *ACRES Reservoir Simulation Program : Level 2 Documentation Manual*. Acres International, Niagara Falls, Ontario, Canada.
- ARSP (2000) *Acres Reservoir Simulation Program, User Manual* –Boss, Inc., EEUU.
- AyEE (1986). *Estudio de la Factibilidad Técnica Económica de los Aprovechamientos sobre los Ríos San Antonio y Anisacate*. Córdoba: Convenio de Cooperación y Asistencia Técnica Financiera entre el Estado Nacional y la Provincia de Córdoba, Agua y Energía Eléctrica.
- Castelló,E., Rodríguez,A., Moya, G., Bartó,C.; Chini,I. y Menajovsky,S. (2000) *Evaluación de alternativas para aprovechamiento del recurso hídrico superficial en el Gran Córdoba, Arg.* XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, AIIH, Córdoba, Arg. Tomo 1, 695-704, ISBN 950-33-0268-4.
- Moya, G. (2005). *Análisis para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de los Ríos Suquia y Xanaes, Provincia de Córdoba*. Córdoba, Argentina: FCEFYN, Universidad Nacional de Córdoba.
- Moya, G. (2000). *Análisis de disponibilidad de los recursos hídricos superficiales del área del Gran Córdoba*. Córdoba, Argentina: FCEFYN, Universidad Nacional de Córdoba.
- Moya, G. (2004). *Análisis para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de los ríos Suquia y Xanes*. Córdoba, Tesis de Maestría en Cs. de la Ingeniería - M. Recursos Hídricos, FCEFYN, Universidad Nacional de Córdoba.
- Moya, G. (2003). *Informe de Beca*. Córdoba, Argentina: Secretaría de Ciencia y Técnica, Universidad Nacional de Córdoba.
- Vicario, L. (2008). *Evaluación de las sequías hidro-meteorológicas en la cuenca del dique San Roque*. Córdoba, Tesis de Maestría en Cs. de la Ingeniería - M. Recursos Hídricos, FCEFYN, Universidad Nacional de Córdoba.