

Optimización de la distribución de agua potable rural mediante el uso de la programación lineal

Optimizing the distribution of rural drinking water by using linear programming

Mauricio Castillo-Vergara, Felicindo Homero Cortes, Claudia Isabel Vigorena Merino, Rodolfo Andrés Díaz Gomez, Cesar Espindola Arellano

Palabras clave: sequía, agua potable rural, gestión hídrica, eficiencia energética, optimización, programación lineal

Key words: drought, water bed, water management, energy efficiency, optimization, linear programming

RESUMEN

La región de Coquimbo se encuentra en sequía la cual afecta fuertemente la agricultura, economía e incluso el consumo de agua potable de sus habitantes en algunas comunas. Este estudio tiene por objetivo desarrollar una investigación de aplicación para determinar un plan óptimo de distribución de agua potable a los habitantes de localidades rurales de la comuna de Combarbalá en Chile, con el uso de camiones aljibes (cisternas). Basado en técnicas de investigación de operaciones, cuya función objetivo es la de minimizar el número de viajes para disminuir los costos asociados al traslado del agua; se consideran las condiciones que presenta la comuna en estudio a Septiembre de 2013. Se establece un modelo lineal que minimiza el número de viajes, permitiendo generar un ahorro de 21% en los costos de operación con la solución propuesta, y asegura la distribución de agua a toda la población objetivo de la comuna.

ABSTRACT

The region of Coquimbo is in drought which strongly affects agriculture, economy and even the consumption of drinking water to the residents in some of its municipalities. This study aims to determine an optimal plan for the distribution of drinking water to the habitants of rural areas of the Combarbalá commune in Chile, with the use of trucks cisterns (tanks). Based on operations research techniques, which objective function is to minimize the number of trips to reduce the costs associated with moving water; the conditions presented by the municipality study in September 2013 were taken into account. A linear model considered to minimize the number of trips, allowing generating a decrease of 21% in operating costs, with the proposed solution and ensuring water distribution to the entire target population of the commune.

INTRODUCCIÓN

La Real Academia Española (RAE) define la sequía como "Tiempo seco de larga duración", y como éstas hay diversas definiciones, Valiente (2001) cita a Wilhite y Glantz quienes en 1985 detectaron más de 150 definiciones de este tipo, categorizándolas en cuatro grupos según la disciplina científica desde la que sea analizado el fenómeno: sequía meteorológica, sequía hidrológica, sequía agrícola y sequía socioeconómica.

El suministro de agua en cantidad suficiente, calidad adecuada y el momento adecuado es una condición necesaria para garantizar un desarrollo sostenible. Las sequías son una de las crisis ambientales más importantes que afectan tanto a los ecosistemas como a los sectores económicos Bravo et al. (2010). A diferencia de otros eventos meteorológicos extremos, las sequías se caracterizan por largos períodos de escasez de agua que se activan ya sea por razones biofísicas o inducidos por el hombre, Meza (2013). Desde la década de 1970, las características de la sequía tales

como la intensidad, la duración y el área afectada por las sequías están aumentando, el porcentaje del mundo sometido a la sequía extrema se expandirá de 1% a 30% en el siglo 21 Wang et al. (2014). La evidencia en el cambio de las condiciones climáticas en todo el mundo es cada vez más apremiante, los datos de todos los continentes muestran que muchos sistemas naturales están siendo afectados Roco et al. (2014), los recursos hídricos son de extrema importancia, ya que la sequía es uno de los principales retos que enfrenta el planeta a la luz del cambio climático Castillo-Vergara et al. (2013).

Dentro del contexto mundial, Chile podría ser calificado como un país privilegiado en materia de recursos hídricos. Al considerar todo el territorio chileno, el volumen de agua procedente de las precipitaciones que escurre por los cauces es de 53.000 m³ por persona al año, superando en 8 veces la media mundial (6.600 m³/habitante/año), y en 25 veces el mínimo de 2.000 m³/habitante/año que se requiere desde la óptica de un desarrollo sostenible MOP (2013), sin embargo, la mayor parte de la población de Chile se encuentra en zonas de climas áridos y semiáridos, donde la disponibilidad de agua es inferior a 1.000 m³/habitante/año Valdés-Pineda et al. (2014), tal es el caso de la región de Coquimbo, área que corresponde a la zona de estudio.

Si se analiza el Standardized Precipitation Index (SPI) que es un indicador que cuantifica las condiciones de déficit o exceso de precipitaciones en un lugar, para un periodo determinado de tiempo, que varía entre 1 hasta 48 meses McKee et al. (1993), el monitoreo de la sequía meteorológica en Chile es calculado para 42 estaciones meteorológicas entre 28°S y 44°S, la mayor parte de las cuales comenzaron sus observaciones en 1971, se actualiza mensualmente y el valor se clasifica en 9 categorías, con valores negativos para condiciones secas y positivos para condiciones lluviosas, y de acuerdo a la Resolución DGA 1674 establece como sequía las condiciones de

precipitaciones acumuladas a contar del mes de abril, de modo que en cualquier caso quede comprendido a lo menos el periodo abril-agosto, tengan un indicador de sequía (SPI) menor o igual a -0,84.

Con lo anterior se declara zona de sequía a la región de Coquimbo según Decreto Supremo N° 856, el que se amplía por Decreto Supremo N° 105. La región de Coquimbo presenta una baja global de lluvias del orden de un 80%, ubicándose el déficit de precipitaciones alrededor de un 50%, los ríos mantienen escurrimientos cercanos a los mínimos históricos según la Dirección General de Aguas (marzo 2013). Lo anteriormente expuesto ha provocado que exista carencia de suministro de agua potable para el consumo. La provincia de Limarí, la segunda de tres provincias de la Región de Coquimbo, es el sector que se está viendo más afectado por esta condición, entonces, es urgente encontrar alternativas que permitan dar solución a problemas de escasez del recurso hídrico.

La comuna de Combarbalá es una de las cinco comunas de la provincia de Limarí, se ubica a 291 km al sur de la capital regional ubicada en la parte sur oriental de la Provincia, en las coordenadas geográficas 31° 11" de latitud y a los 71° 02" de longitud; a una altura de 904 metros sobre el nivel del mar. La comuna se inserta en interfluvio, entre los ríos Limarí por el norte y Choapa por el sur; se encuentra en la región de los valles transversales, presentando un notorio relieve montañoso, cuya población proyectada al año 2012 es de 13.340 habitantes INE (2012) un 39,26% corresponde a población urbana y 60,74% a población rural, posee una superficie estimada de 2257,5 km², la tabla 1 muestra la distribución geográfica de la comuna segmentada por territorio y sus localidades y se presenta la geografía en la figura 1, en la comuna se ubica el embalse Cogotí con un volumen de almacenamiento de 150 millones de m³ Pizarro et al. (2013) y se encuentra a septiembre 2013 con una disponibilidad menor al 5% Ceazamet (2013), con lo que gran parte de los sectores de la comuna

quedan dependiendo del nivel que puedan alcanzar los pozos o napas subterráneas de las

cuales se extrae el agua para el consumo diario de la población.

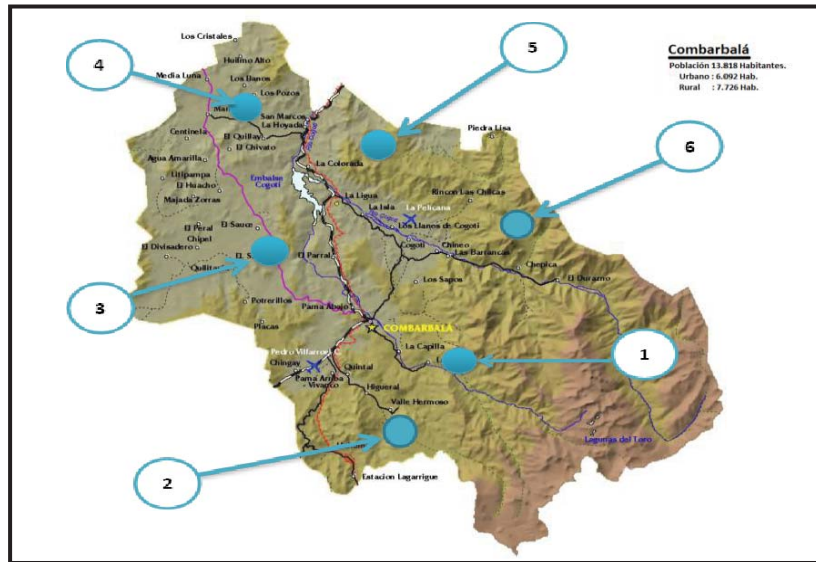


Figura 1. Mapa Geográfico comuna de Combarbalá

Tabla 1. Población por sectores

| Sectores | Habitantes | Rural/Urbano |
|-----------------|------------|--------------|
| 1 Combarbalá | 6499 | 597 / 5902 |
| 2 Valle Hermoso | 542 | 542 / 0 |
| 3 Quilitapia | 1556 | 1556 / 0 |
| 4 Manquehua | 1119 | 1119 / 0 |
| 5 San Marcos | 1262 | 1262 / 0 |
| 6 Cogotí | 2362 | 2362 / 0 |

A septiembre 2013, la distribución de agua potable a los sectores rurales está a cargo del municipio en conjunto con el departamento de emergencia perteneciente a la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI), se lleva a cabo con 6 camiones aljibes (cisternas), cuya capacidad total alcanza a los 67 m³, con un programa de abastecimiento de lunes a viernes, y el itinerario semanal depende de la demanda y sector demandante, por lo que resulta ser variable de un periodo a otro, la Tabla 2

muestra la placa de los camiones disponibles y la capacidad en litros.

Tabla 2. Camiones Disponibles

| Placa Camión | Capacidad (m ³) |
|------------------------|-----------------------------|
| ZX6773 | 10 |
| TB5962 | 15 |
| LC8580 | 10 |
| LW3234 | 12 |
| BLWX84 | 5 |
| ZX7165 | 5 |
| Capacidad total | 67 |

Los puntos de abastecimiento utilizados en la comuna son dos, el primero ubicado en la ciudad de Combarbalá y es agua tratada y clorada, con una disponibilidad máxima de 100 m³ diarios a un precio de 669 \$/m³, el segundo punto se encuentra en la localidad de Manquehua con una oferta de 40

m³ diarios a un precio de 1.100 \$/m³, pero se debe utilizar un equipamiento incorporado en los camiones para realizar la cloración en movimiento, el detalle se refleja en la Tabla 3 adjunta.

La entrega del agua se puede realizar en un depósito común dentro de la localidad y esta se distribuye por redes de distribución de agua potable rural, y para quienes no tienen acceso los camiones depositan el agua en copas de aguas de 1 m³ en los domicilios de los habitantes, es este segmento para el que se requiere optimizar el proceso de entrega de agua potable.

Tabla 3. Disponibilidad y Precio Fuentes de Agua

| Fuente | Cap. máx. diaria | Cap. máx. mensual | Costo \$/m3 | Costo \$/litro |
|-----------------|------------------|-------------------|-------------|----------------|
| Pozo Combarbalá | 100 m3 | 2000 m3 | 669 | 0,669 |
| Pozo Manquehua | 40 m3 | 800 m3 | 1100 | 1,1 |

DISEÑO METODOLÓGICO

La programación lineal data de 1939, cuando Leonid Kantorovich (1939) expresó por primera vez un problema en la economía en forma lineal, sin embargo, programación lineal como un área de estudio se ha atribuido a George Dantzig (2002) quien también desarrolló el método simplex en 1947, ha sido ampliamente estudiado en los programas de ingeniería, administración, matemáticas y otros campos debido a su aplicabilidad Ramírez et al. (2012), el modelo de transporte es una clase especial de programación lineal que tiene que ver con transportar un artículo desde sus fuentes, hasta sus destinos.

El objetivo es determinar el programa de transporte que minimice el costo total del

transporte y que al mismo tiempo, satisfaga los límites de oferta y demanda Taha (2004).

El modelo queda representado por una función, sujeta a restricciones, ecuaciones 1, 2 y 3.

$$\text{Min (Max)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

Restricciones:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = b_j \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i,j$$

Para resolver el problema de obtener un plan óptimo de distribución, se construirá un modelo de transporte que se adapte a las condiciones que se presentan en la actualidad en la Comuna de Combarbalá, la variable de decisión se denomina Número de Viajes, la que hace referencia a los números de viajes que los diferentes camiones realizan (solo toma valores enteros), donde:

X_{pijk} : Cantidad de viajes desde la fuente de agua p hacia el sector j en un tipo de camión i el día k.(4)

p (1,2) p = Fuente de agua (punto de abast.)

i (1,2...6) i = Tipo de camiones

j (1,2,...6) j = Sector, localidad rural

k (1,2,...5) k= Día de la semana

El primer parámetro a considerar es fuente de abastecimiento de agua. Para efectos del estudio solo se utilizará la fuente 1 (pozo Combarbalá), debido que ésta es la que presta los servicios de abastecer agua puerta a puerta.

El segundo parámetro a considerar es Tiempo de viaje, corresponde al tiempo de trayecto y operación total que existe entre la fuente de abastecimiento y el sector a abastecer. Dichos valores quedan expresados en la Tabla 4.

T_{pij} : Tiempo total desde la fuente de agua p en un camión tipo i hacia el sector j (5)

Capacidad del Camión es el tercer parámetro, representa a la capacidad de litros que cada camión aljibe almacena, el detalle se puede revisar en la Tabla 2 presentada previamente.

Cap_i : representa la capacidad del camión tipo i (6)

El último parámetro es la demanda semanal de cada sector, esta queda representada en la tabla 5.

D_j : Demanda semanal del sector j (7)

Restricciones del Modelo

▪La cantidad de agua entregada semanalmente debe ser mayor o igual a la demanda semanal del sector correspondiente.

▪La cantidad de agua entregada diaria no debe sobrepasar el máximo permitido por la fuente de agua

▪La cantidad de horas trabajadas por camión no puede superar las 9 horas diarias según ley laboral Chilena

▪El número de viajes diarios no debe sobrepasar el valor tope que se ha determinado, según tipos de viaje y camión aljibe considerado.

▪El camión placa TB5962 de capacidad 15 m³, solo puede abastecer al sector de Quilitapia, debido a que los caminos que existen en los otros sectores no son aptos para que éste pueda cumplir su función de forma segura.

Tabla 4. Tiempos en horas de trayectos y de descarga por tipo camión para cada sector

| Placa Camión | Combarbalá | Valle Hermoso | Quilitapia | Manquehua | San Marcos | Cogotí |
|--------------|------------|---------------|------------|-----------|------------|--------|
| ZX6773 | 3 | 3,6 | 3,7 | 4 | 3,5 | 4,1 |
| BLWX84 | 1,75 | 2,25 | 2,45 | 2,75 | 2,25 | 2,65 |
| TB5962 | - | - | 5,05 | - | - | - |
| LC8580 | 3 | 3,6 | 3,7 | 4 | 3,5 | 4,1 |
| LW3224 | 3,5 | 4,1 | 4,2 | 4,5 | 4 | 4,6 |
| ZX7165 | 1,75 | 2,25 | 2,45 | 2,75 | 2,25 | 2,65 |

Tabla 5. Demanda requerida por sector

| Sector | m ³ /semana |
|-----------------|------------------------|
| 1.Combarbalá | 31,906 |
| 2.Valle Hermoso | 83,377 |
| 3.Quilitapia | 115,283 |
| 4.Manquehua | 90,601 |
| 5.San Marcos | 15,953 |
| 6.Cogotí | 80,066 |

Modelo matemático

Dada las consideraciones presentadas:

p fuente de agua (p= 1)

i= tipo de camión el cual se utiliza para la distribución (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)

j= destino o sector al que se distribuye el agua (j= 1, 2, 3, 4, 5, 6)

k = días de la semana en la cual se ejecuta la distribución (k= 1, 2, 3, 4, 5)

Así, la formulación matemática se establece como:

X_{ijk} = número de viajes que realiza un camión tipo i, hacia un destino j, el día k

F.O: **Min viajes:** $\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^5 x_{ijk}$ (8)

Sujeto a las siguientes restricciones

Dado J $\sum_{i=1}^6 \sum_{k=1}^5 Cap_i X_{ijk} \geq D_j$ (9)

Dado k $\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 Cap_i X_{ijk} \leq 100000_{litros}$ (10)

Dado i $\sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^5 T_{ij} X_{ijk} \leq 9_{horas\ diarias}$ (11)

$X_{ijk} \geq 0$; Entero

Donde: Cap_i = Capacidad de cada camión tipo i

D_j = Demanda del sector j

T_{ij} = Tiempo diario en horas en el cual se realiza la operación de distribución

La solución al problema propuesto, se realizó utilizando la herramienta Solver del paquete Microsoft Office Proplus2013 ® licencia 3F3DN – CCQVQ - 68R44-C4C3Q-RJPDH método Evolutionary.

RESULTADOS

El modelo permitió optimizar la distribución de agua potable rural mediante camiones aljibes, a los diferentes sectores con la infraestructura de camiones disponible, los que se indican en la Tabla 6.

El modelo permite reducir en un 15% la cantidad de viajes realizados para cumplir con la demanda requerida, además permite disminuir en un 2% la cantidad de kilómetros recorridos por los camiones.

Tabla 6. Modelo de optimización plan de distribución de agua potable semanal

| Placa Camión | Capacidad | m ³ entregados | N° viajes | N° personas atendidas | lts/persona | KM recorridos |
|--------------|-----------|---------------------------|-----------|-----------------------|-------------|---------------|
| BLWX84 | 5000 LTS | 40 | 8 | | | 622 |
| ZX6773 | 10000 LTS | 100 | 10 | | | 893,6 |
| TB5962 | 15000 LTS | 75 | 5 | 1386 | 45,3514739 | 430 |
| LC8580 | 10000 LTS | 100 | 10 | | | 900 |
| LW3224 | 12000 LTS | 120 | 10 | | | 661,6 |
| ZX7165 | 5000 LTS | 5 | 1 | | | 32 |

El modelo permite reducir en un 15% la cantidad de viajes realizados para cumplir con la demanda requerida, además permite disminuir en un 2% la cantidad de kilómetros recorridos por los camiones.

Adicionalmente al análisis anterior, se sensibilizó el modelo disminuyendo el uso de camiones a cinco unidades, no utilizando el camión placa TB5962 con capacidad de 15 m³, lo que permite disminuir los costos de operación en un 21% con 53 viajes para la flota de cinco camiones.

Considerando este último escenario se presenta, en la Tabla 7, la planificación semanal para cada camión y sector asociado.

Tabla 7. Planificación semanal plan óptimo de distribución

| Sector | Parámetros | Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes |
|------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------|
| 1. Combarbalá | Camión | | BLWX84 | LW3224 | | BLWX84 |
| | Capacidad m ³ | | 5 | 12 | | 5 |
| | Cantidad m ³ | | 5 | 24 | | 5 |
| | n° viajes | | 1 | 2 | | 1 |
| 2. Valle Hermoso | Camión | ZX7165 / LW3224 | BLWX84 / LW3224 | | LW3224 | LW3224 |
| | Capacidad m ³ | 5 / 12 | 5 / 12 | | 12 | 12 |
| | Cantidad m ³ | 34 | 17 | | 24 | 12 |
| | n° viajes | 2 / 2 | 1 / 1 | 2 | 2 | 1 |
| 3. Quilitapia | Camión | LC8580 / ZX6773 | ZX6773 | ZX6773 | BLWX84 / LC8580 | BLWX84 / LW3224 |
| | Capacidad m ³ | 10 / 10 | 10 | 10 | 5 / 10 | 5 / 12 |
| | Cantidad m ³ | 30 | 20 | 20 | 30 | 17 |
| | n° viajes | 1 / 2 | 2 | 2 | 2 / 2 | 1 / 1 |
| 4. Manquehua | Camión | LC8580 | BLWX84 / ZX6773 | LC8580 | ZX6773 / ZX7165 | ZX6773 / BLWX84 |
| | Capacidad m ³ | 10 | 5 / 10 | 10 | 10 / 5 | 10 / 5 |
| | Cantidad m ³ | 10 | 25 | 10 | 25 | 25 |
| | n° viajes | 1 | 1 / 2 | 1 | 2 / 1 | 2 / 1 |
| 5. San Marcos | Camión | | BLWX84 / LW3224 | | | |
| | Capacidad m ³ | | 5 / 12 | | | |
| | Cantidad m ³ | | 17 | | | |
| | n° viajes | | 1 / 1 | | | |
| 6. Cogotí | Camión | BLWX84 / ZX6773 | | BLWX84 / LC8580 / ZX7165 | BLWX84 | ZX6773 / ZX7165 |
| | Capacidad m ³ | 5 / 5 | | 5 / 10 / 5 | 5 | 10 / 5 |
| | Cantidad m ³ | 20 | | 30 | 5 | 30 |
| | n° viajes | 3 / 1 | | 3 / 1 / 1 | 1 | 2 / 2 |

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La región de Coquimbo ha invertido más de 50 millones de dólares para paliar los efectos de la sequía en la Región, sin embargo, se siguen percibiendo impactos de dicha condición, pues en su mayoría las iniciativas buscan revertir solo los impactos económicos asociados a la captación, acopio, abastecimiento y utilización del recurso agua. En particular, la optimización lograda con este estudio, no solo contribuye a reducir los impactos económicos y operacionales, sino también permite optimizar el consumo de combustible de los procesos antes señalados, reduciendo la huella de carbono de los mismos, abriendo un importante

campo de contribución en el ámbito de la eficiencia energética, reduciendo la presión sobre la variable ambiental de los mismos Espíndola y Valderrama (2012).

En el orden de los impactos sociales el desarrollo de estudios tendientes a optimizar la gestión hídrica destinada al consumo humano permite atender necesidades inelásticas como la seguridad de consumo del vital líquido, la seguridad alimentaria, la reducción del riesgo sanitario y en base a este abastecimiento evitar el éxodo rural, hacia los espacios de concentración urbana en búsqueda de nuevas condiciones de servicio, abastecimiento de agua potable y por cierto de empleo.

CONCLUSIONES

Mediante esta investigación se determina un modelo óptimo para la distribución de agua potable puerta a puerta a los habitantes de la comuna de Combarbalá para una población aproximada de 14.000 personas, que están fuera de cobertura urbana y/o agua potable rural, la herramienta utilizada fue un modelo de programación lineal.

En cuanto a los ahorros generados por la utilización del modelo optimizado demuestra un beneficio de un 21%, que representa un ahorro de 23,168.43 US\$ mensuales a tasa de cambio de septiembre 2013, situación relevante para una comuna como la estudiada. El modelo permite también, asegurar la entrega de agua potable a todos los habitantes de la comuna independiente de su condición, cuestión particularmente importante en la condición de zona de catástrofe por sequía en la Región.

Para seguir profundizando los beneficios, es que el Gobierno Regional, debiera considerar realizar estudios de optimización para todas las fuentes de agua disponibles, comunas de la región, infraestructura de camiones disponibles y sistemas

de distribución de agua potable rural, a fin de optimizar el recurso para todas las localidades de la región afectadas por la sequía, con esto desarrollar trabajos futuros en esta línea.

Finalmente, se entiende que el problema del abastecimiento de agua no se resuelve integralmente con este estudio, pero la replicabilidad del mismo en otras comunas y regiones del país, ofrece una importante contribución a avanzar en una solución en la gestión hídrica ambientalmente sustentable, económicamente eficiente y socialmente armónica, en especial, cuando el territorio afectado por la sequía en Chile alcanza a cinco regiones desde Atacama a Bio Bio, zona que según datos Dirección Meteorológica de Chile lleva cuatro años consecutivos con déficit de precipitaciones de agua lluvia y nieve, registrándose para este período uno de los de los tres años más secos desde 1866 AndessChile (2014). Las limitaciones del estudio, como primera aproximación, se centra en una fuente de agua para toda la zona rural afectada dentro de la comuna, pudiendo generar resultados distintos al incorporar otras fuentes de agua y otros usuarios de servicios como colegios, postas de la comuna.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo prestado por el Gobierno Regional de la Región de Coquimbo - Chile y la Universidad de La Serena a través de la

dirección de Investigación, para la realización de este trabajo. Se agradece también el apoyo y respaldo brindado por el Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de La Serena.

REFERENCIAS

AndessChile (2014), Informe de gestión de la sequía 2014 Industria sanitaria en Chile, regiones Atacama al Biobio.

Bravo Peña, Luis Carlos, Castellanos Villegas, Alejandro E., & Doode Matsumoto, Olga Shoko. (2010). Sequía agropecuaria y vulnerabilidad en el centro oriente de Sonora: Un caso de estudio enfocado a la actividad ganadera de producción y exportación de becerros. *Estudios sociales*. 18(35), 209-241.

Castillo-Vergara Mauricio, Alvarez-Marin Alejandro, Carvajal-Cortes Susana, Salinas-Flores Sebastián (2013), Implementation of a Cleaner Production Agreement and impact analysis in the grape brandy (pisco) industry in Chile, *Journal of Cleaner Production*, Available online 14 October 2013.

Centro de estudios avanzados en zonas áridas (2013), Boletín regional Septiembre 2013.

Dantzig George b. (2002). *Linear programming*. *Operations Research* © 2002 INFORMS. Vol. 50, No. 1, January–February 2002, pp. 42–47.

Diario Oficial de la República de Chile (2013), Amplía declaración de zonas afectadas por la catástrofe de la situación de sequía, a las comunas que indica de las provincias de Choapa y Elqui, de la Región de Coquimbo, 28th January 2013. Decreto Supremo N°105.

Diario Oficial de la República de Chile (2012), Declara como afectadas por la catástrofe a diversas comunas de las provincias de Elqui, de Limarí y de Choapa, todas de la Región de Coquimbo, situación que deriva de la prolongada sequía que

ha asolado a esa zona del país, 06th August 2012, Decreto Supremo N° 856.

Diario Oficial de la República de Chile (2012), Deja sin efecto resolución D.G.A. N° 39 de 09 de febrero de 1984 y establece nuevos criterios para calificar épocas de extraordinaria sequía, 12th June 2012. Resolución DGA 1674.

Dirección General de Aguas (2013), "Diagnóstico plan maestro para la gestión de Recursos hídricos, Región de Coquimbo" Tomos I y II. Versión 0. Julio 2013.

Espíndola, César, & Valderrama, José O. (2012). Huella del Carbono. Parte 2: La Visión de las Empresas, los Cuestionamientos y el Futuro. *Información tecnológica*, 23(1), 177-192.

Instituto Nacional de Estadísticas (2012), *Población y Sociedad, aspectos demográficos*. ISBN: 978-956-7952-74-8.

Kantorovich L. V. (1939), *Mathematical Methods of Organizing and Planning Production*. Leningrad State University.

McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales: In: *Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology*. Anaheim, California, January 17–22, 1993. American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 179–184.

Meza Francisco J. (2013). Recent trends and ENSO influence on droughts in Northern Chile: An application of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, *Weather and Climate Extremes*, Volume 1, September 2013, Pages 51-58.

- Ministerio de Obras Públicas (2013), Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012 – 2025.
- Pizarro Roberto, Garcia-Chevesich Pablo, Valdes Rodrigo, Dominguez Francina, Hossain Faisal, Ffolliott Peter, Olivares Claudio, Morales Carolina, Balocchi Francisco, Bro Per (2013). Inland water bodies in Chile can locally increase rainfall intensity, *Journal of Hydrology*, Volume 481, 25 February 2013, Pages 56-63.
- Ramírez, A. L, Buitrago, O, Britto, R. A, y Fedossova, A. (2012). Un nuevo algoritmo para resolver problemas de programación lineal. *Ingeniería e Investigación*, 32 (2), 68-73.
- Roco Lisandro, Engler Alejandra, Bravo-Ureta Boris, Jara-Rojas Roberto (2014). Farm level adaptation decisions to face climatic change and variability: Evidence from Central Chile, *Environmental Science & Policy*, Volume 44, December 2014, Pages 86-96.
- Taha Hamdy A. (2004). *Investigación de Operaciones*, 7ª Edición, Pearson Educación, 2004, México. ISBN: 970-26-0498-2.
- Valdés-Pineda Rodrigo, Pizarro Roberto, García-Chevesich Pablo, Valdés Juan B., Olivares Claudio, Vera Mauricio, Balocchi Francisco, Pérez Felipe, Vallejos Carlos, Fuentes Roberto, Abarza Alejandro, Helwig Bridget (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change, *Journal of Hydrology*. Volume 519, Part C, 27 November 2014, Pages 2538-2567.
- Valiente Marcos Óscar (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación, *Investigaciones Geográficas*, n° 26 (2001) pp. 59-80.
- Wang Qianfeng, Wu Jianjun, Lei Tianjie, He Bin, Wu Zhitao, Liu Ming, Mo Xinyu, Geng Guangpo, Li Xiaohan, Zhou Hongkui, Liu Dachuan (2014). Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale, *Quaternary International*, Volume 349, 28 October 2014, Pages 10-21.

Autores

Mauricio Castillo-Vergara. Magister en Gestión de Empresas. Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de La Serena, Chile.

E-mail: mhcastillo@userena.cl

Felicindo Homero Cortes. Doctor(c) en Desarrollo Urbano Sustentable. Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de La Serena, Chile

E-mail: fcortes@userena.cl

Claudia Isabel Vigorena Merino. Ingeniero Civil Industrial. Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de La Serena, Chile

E-mail: claudiavgrn@gmail.com

Rodolfo Andrés Díaz Gomez. Ingeniero Civil Industrial. Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de La Serena, Chile

E-mail: diazgomez.rodolfo@gmail.com

Cesar Espindola Arellano. Dr (c) en Gestión de Empresas. Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de La Serena, Chile

E-mail: cespindola@userena.cl

Recibido: 01-11-2014

Aceptado: 15-12-2014