



Título: El Análisis Envolvente de Datos aplicado como Sistema de Soporte a la Decisión para la gestión sostenible en redes de distribución de agua potable

Autores y e-mails:

José Antonio Palomero González^{1 y 2} (joanpagon@globalomnium.com)

Ramón Fuentes³

Francesc Hernández⁴

Javier Macián¹

Departamento: ¹EMIVASA (Empresa Mixta Valenciana del Agua); ²Instituto Interuniversitario de Desarrollo Local; ³Análisis económico aplicado; ⁴ Economía Aplicada II

Universidad: ¹Global Omnium; ²Universidad de Valencia; ³Universidad de Alicante; ⁴Universidad de Valencia

Área Temática: S03 – La gestión del agua en el contexto de la economía circular.

Resumen: La gestión de las redes de distribución de agua potable se trata de un proceso muy complejo debido a la multitud de objetivos que se deben cumplir. Los objetivos básicos son: ofrecer el servicio más eficiente, garantizar al usuario agua en cantidad y en calidad suficiente para satisfacer sus necesidades, con el menor riesgo para la salud pública y el menor coste para el usuario. Por ello, es necesario gestionarlos con un enfoque multidisciplinar con el fin de garantizar el mejor servicio posible. El objetivo es presentar un Sistema de Soporte de Decisiones (DSS) utilizando el Análisis Envolvente de Datos (DEA), concretamente el modelo Russell distancia direccional ponderado. Dicho modelo se va aplicar a la red sectorizada de la ciudad de Valencia durante el periodo de estudio 2015 – 2016 con el fin de comprobar su poder como herramienta de apoyo a la decisión.

Palabras Clave: Análisis Envolvente de Datos (DEA), Eficiencia, Gestión sostenible redes de distribución, Sistema de Soporte a la Decisión (DSS)

Clasificación JEL:



1- Introducción

La red de distribución de agua potable se define como el conjunto de elementos encargados del transporte del agua desde las ETAPS y/o puntos de almacenamiento hasta los usuarios, garantizando que exista un caudal preciso con la presión necesaria y la calidad de agua necesaria sin que se produzcan contaminaciones durante el transporte (Hernández-Muñoz, 2008).

Los indicadores de calidad que habitualmente se han utilizado para definir el buen estado de una red de distribución, son los siguientes: la fiabilidad, la diversificación de las captaciones y la capacidad de los depósitos de almacenamiento; las presiones de servicio, los caudales mínimos de la red de distribución; la calidad de agua suministrada según la normativa vigente; interrupción del suministros (la duración y la frecuencia en que se dan); el tiempo de respuesta de la Compañía en dar de alta a un nuevo usuario, en dar respuestas a las quejas o denuncias (Cabrera et al., 1993; Aguirre, 1996; Hernández-Muñoz, 2008)

De manera general, las redes de distribución se han clasificado con distintos criterios, siendo el más común la clasificación según la tipología del sistema, es decir, en función de cómo están conectadas las tuberías entre sí (Aguirre, 1996; Hernández-Muñoz, 2008;). Atendiendo a este criterio, existen 3 tipos de redes: ramificadas, malladas y mixtas. Las redes ramificadas son aquellas en las que existe un único camino a cada nudo de la red, es decir, sólo pueden tener un punto de alimentación. Las redes malladas son aquellas donde el agua tiene varios caminos para circular (mínimo dos). Finalmente, las redes mixtas son redes malladas con subsistemas ramificados (Aguirre, 1996 Hernández-Muñoz, 2008).

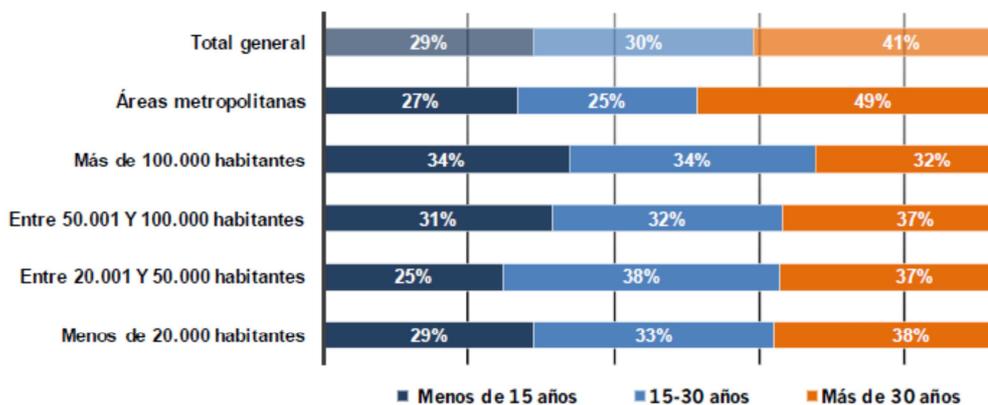
A continuación, con el fin de centrar la temática, se realiza una breve caracterización de las redes de distribución en España. Inicialmente, se comentan las variables que generalmente son utilizadas en la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento (AEAS) para caracterizar las redes de distribución. Dichas variables son: la longitud de la red, el uso del agua de dicha red, los materiales que la forman, la antigüedad de la misma (AEAS, 2016).

En primer lugar, la longitud media de la red de distribución, es de 4,80 metros por habitante, siendo los municipios de más de 100.000 habitantes y las áreas

metropolitanas las que disminuyen esta media, con un índice de 3,05 y 3,25 metros/habitante respectivamente (AEAS, 2016). En segundo lugar, el uso mayoritario en las redes de distribución en España es el uso doméstico, que supone el 73% de los usos del agua frente al 11% de uso industrial y un 16% de otros usos, como puede ser el riego de jardines (AEAS, 2016). En tercer lugar, del análisis de los materiales utilizados en la composición de la red a nivel nacional, se observa que el material más utilizado es el polietileno, el cual supone un 34%; en segundo lugar, la fundición dúctil (32%); y, por último, el tercer material es el fibrocemento que supone un 20% de la composición de las redes (AEAS, 2016)

Por último, una variable que ayuda a conocer el estado de la red su antigüedad. En el Gráfico 1 se observa la antigüedad de la red en España por tamaño de población en 3 categorías.

Antigüedad de la red por tamaño de municipio



Fuente: AEAS - Suministro de agua potable y saneamiento en España 2016 XIV Encuesta nacional Resumen ejecutivo, 2016

Tal y como se deduce del Gráfico 1 de manera general, sólo el 29% de media de las redes de distribución en España tienen menos de 15 años, por lo que se puede deducir que son redes de distribución maduras, donde el 30% tienen entre 15 y 30 años y el 41% son redes de más de 30 años. Además, es significativo cómo prácticamente el 50% de la red de abastecimiento de las áreas metropolitanas tienen una antigüedad superior a los 30 años.

Una vez caracterizada la red, es importante comentar las principales dificultades que se encuentran los gestores. En la Tabla 1 se observan las principales dificultades para la gestión de las redes de distribución.

Tabla 1: Principales dificultades en las redes de distribución y sus posibles causas	
Problemas detectados	Posibles Causas
Roturas de Tuberías	Presión excesiva Problemas de sobrepresión Corrosión interna Corrosión externa
Movimiento del suelo o zanjas	Mala preparación del asiento de las tuberías Desplazamientos en el suelo
Intermitencias en el abastecimiento	Rotura de tuberías Capacidad hidráulica de los conductos Depósitos y concreciones en los conductos Fallos en la instalación general Problemas de mantenimiento Consumos de agua no autorizados
Presión escasa	Variación de la capacidad Depósitos y concreciones Falta de mantenimiento Consumos no autorizados de agua Aspectos topográficos
Variación de la calidad del agua	Rotura de tuberías Presión escasa

	<p>Consumos no autorizados</p> <p>Intermitencias en el abastecimiento</p>
--	---

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en dicha tabla, la mayoría de las dificultades se encuentran relacionadas entre ellas, tanto en origen como en los efectos negativos sobre la calidad del servicio. Por ejemplo, una rotura de tuberías debida a intermitencias del abastecimiento puede suponer pérdidas de presión en los grifos de los usuarios y a su vez una variación de la calidad del agua.

Dada la complejidad de gestión de las redes de distribución, y con el fin de facilitar su gestión y ofrecer un servicio de calidad, son muy utilizados los Sistemas de Soporte a la Decisión (DSS). Estos se definen como herramientas multidisciplinarias que permiten el análisis de grandes cantidades de variables para ayudar a los gerentes a tomar decisiones basadas en datos. La principal característica de los DSS es su capacidad de análisis a diferentes escalas y su capacidad para ofrecer información agregada de todas las variables utilizadas en dicho análisis (Pardo-Picazo et al., 2010).

Los DSS aplicados en la gestión de redes de distribución presentan como característica principal el reemplazo de tuberías utilizando diferentes enfoques. El enfoque más común utilizado se centra en la combinación de variables técnicas mediante ratios (Scholten et al., 2013; Gurung et al., 2015; Menke et al., 2016). En muchos casos, los parámetros se combinan con otras variables, como los modelos de calidad del agua (Alegre et al., 2013); o el nivel de fugas (Kanakoudis et al., 2013; 2015).

Sin embargo, hoy en día existen otros modelos que incorporan un enfoque multidisciplinar utilizando diferentes métodos tales como la Fuzzy (Christodoulou, et al., 2010; Qu et al., 2016) o Life Cost Cycle (Loubet et al., 2014; 2016 ; Jeong et al., 2015; Cai et al., 2016), el método DEA (Choi et al., 2015), métodos multiobjetivo (Mutikanga et al., 2011; Savić et al., 2011) que permiten considerar distintas variables, tanto técnicas como de calidad del agua, materiales, vida útil, etc.

Las principales dificultades para la implantación de un DSS residen en que las redes de distribución necesitan enfoques multidisciplinarios y la mayoría DSS están diseñados con un enfoque técnico, relegando los aspectos económico, social y ambiental a niveles secundarios. Además, los DSS que presentan enfoque multidisciplinario sólo se aplica

de manera parcial y haciendo mucho énfasis en algunas variables, generalmente en fugas. Otra dificultad es que los DSS generalmente necesitan grandes cantidades de datos, algunos de ellos muy específicos y difíciles de obtener. Además, todos deben estar en las mismas unidades o el resultado obtenido no es fiable (Pardo-Picazo et al., 2010).

El objetivo de este trabajo es contribuir en el campo del DSS a la gestión de las redes de distribución utilizando el modelo direccional Russell ponderado (WRDDM), un modelo DEA no radial que permite gestionar la red de distribución con el fin para obtener suministros de agua sostenibles desde el punto de vista técnico, ambiental y económico.

2-. Método.

El modelo direccional Russel ponderado (WRDDM) se basa en una función de distancia direccional combinada con un método DEA no paramétrico (Barros et al., 2012; Molinos-Senante et al., 2016). Se considera que las entidades usan un vector $x \in \mathfrak{R}_+^N$ para producir dos tipos de vectores de outputs: outputs deseados y outputs no deseados, que se indican con el vector $y \in \mathfrak{R}_+^N$, respectivamente (Fujii et al., 2014).

El conjunto de referencia de tecnología es dado por:

$$T = \{(x, y, b) : x \text{ can produce } (y, b)\} \quad (1)$$

$$(x, y, b) \in T \text{ and } y' \leq y \rightarrow (x, y', b) \in T \quad (2)$$

$$\text{if } (x, y, b) \in T \text{ and } 0 \leq \theta \leq 1, \text{ then } (x, \theta y, \theta b) \in T \quad (3)$$

$$\text{if } (x, y, b) \in T \text{ and } b = 0, \text{ then } y = 0 \quad (4)$$

WRDDM cumple con los siguientes supuestos (Chung et al., 1997): 1) libre disponibilidad de los outputs deseados Ec. (2), indicando que era posible reducir los outputs deseados sin reducir los outputs no deseados (Wei et al., 2015); 2) débil disponibilidad de los outputs no deseados Ec. (3), lo que implica que era factible reducir proporcionalmente los resultados outputs deseados y no deseados (Zhou et al., 2014); 3) los outputs deseados y no deseados, satisfacen el axioma null-jointness o de la nulidad conjunta Ec. (4), lo que significa que los output deseados no podrían producirse sin producir outputs no deseados (Bi et al., 2014)

La función distancia (Ec. 5) tiene como objetivo el aumento de los inputs deseados y la disminución de los outputs no deseados.

$$\vec{D}(x, y, b; g) = \sup\{\rho : (x + \rho g_x, y + \rho g_y, b + \rho g_b) \in T\} \quad (5)$$

Donde el vector $g = (g_x, g_y, g_b) = (-x, 0, -b)$ determina las direcciones en las que se modifican los niveles de los inputs, los resultados outputs deseados y los outputs no deseados. De este modo, la función de distancia direccional ofrece tanto la expansión en outputs deseados como la contracción en outputs no deseados. El valor de ρ refleja la distancia entre la entidad analizada y la frontera. Si dicha entidad está sobre la frontera, entonces $\vec{D}(x, y, b; g) = 0$, y, por lo tanto, es eficiente. Sin embargo, si $\vec{D}(x, y, b; g) > 0$ la entidad es ineficiente y tiene capacidad para mejorar su funcionamiento. (Barros et al., 2012).

Se supone que existen unidades $k = 1, \dots, K$ y cada una de ellas utiliza inputs $x^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_N^k) \in \mathfrak{R}_+^N$ para producir outputs deseados $y^k = (y_1^k, y_2^k, \dots, y_M^k) \in \mathfrak{R}_+^M$ outputs no deseados $b^k = (b_1^k, b_2^k, \dots, b_J^k) \in \mathfrak{R}_+^J$. El WRDDM para el cálculo de la ineficiencia de la empresa k' podría describirse de la siguiente manera (Barros et al., 2012; Fujii et al., 2014).

$$\vec{D}(x^{k'}, y^{k'}, b^{k'}; g) = \rho^{k'} \quad (6)$$

$$= \max \sum_{n=1}^N \omega_n^{k'} \beta_n^{k'} + \sum_{m=1}^M \omega_m^{k'} \beta_m^{k'} + \sum_{j=1}^J \omega_j^{k'} \beta_j^{k'}$$

s. t

$$\sum_{k=1}^K z^k y_m^k \geq y_m^{k'} + \beta_m^{k'} g_{ym} \quad m = 1, \dots, M$$

$$\sum_{k=1}^K z^k b_j^k = b_j^{k'} + \beta_j^{k'} g_{bj} \quad j = 1, \dots, J$$

$$\sum_{k=1}^K z^k x_n^k \leq x_n^{k'} + \beta_n^{k'} g_{xn} \quad n = 1, \dots, N$$

$$\sum_{k=1}^K z^k = 1 \quad k = 1, \dots, K$$

$$z^k \geq 0 \quad k = 1, \dots, K$$

Donde $\beta_n^{k'}$, $\beta_m^{k'}$ and $\beta_j^{k'}$ fueron las medidas de ineficiencia individuales para cada input x_n , cada output deseado y_m y cada output no deseado b_j , respectivamente. Además, z^k fueron las variables de intensidad con las que construir combinaciones convexas de las inputs y outputs observados. Finalmente, los coeficientes $\omega_n, \omega_m, \omega_j$ se asociaron con las prioridades dadas a los inputs y outputs deseados y no deseados. Aunque existen métodos para asignar ponderaciones a un conjunto de variables, en el presente trabajo, se considera que las entidades no tienen prioridades para las diferentes inputs y outputs, es decir, se asume que todas tuvieran la misma importancia y se normalizan respecto de sus medias.

Cabe señalar que el modelo (6) considera la restricción de convexidad y parte del supuesto de que las entidades operan con rendimientos variables a escala (VRS).

4-. Análisis de datos

Los datos han sido facilitados por EMIVASA (Empresa Mixta Valenciana del Agua S.A), la empresa que tiene la gestión del abastecimiento de la ciudad de Valencia. En la Tabla 2 presenta los datos para describir la red de distribución en Valencia en 2016.

Tabla 2: Datos característicos de la red de Distribución en Valencia en 2016	
Número de usuarios	434,115
Volumen facturado	41,602,299 m ³ /año
Consumo Anual (m ³ /usuarios año)	95.83 m ³ /usuarios año
% de Fugas	20%
Número de Sectores	47

Fuente: Elaboración propia a partir de la información disponible

Para aplicar el método expuesto en el apartado anterior, el primer paso es definir las unidades de decisión o decisión maker units (DMUs). En este sentido, se considera que cada uno de los sectores en que se sub-divide la red de distribución metropolitana analizada constituiría una DMU en sí mismo, debido a que se tratan de unidades independientes que en conjunto forman la red de abastecimiento y cada sector tiene

información propia y característica que lo diferencia. De esta manera se cumple la regla de Cooper y se tiene un número de unidades relevantes, ya que la regla de Cooper se define como $n \geq \max \{m \times s, 3 \times (m + s)\}$ donde m representa el número de inputs y s representa el número de outputs (Cooper et al., 2007). En el presente trabajo hay 2 inputs, 1 output deseado y 3 outputs no deseados, y 47 DMUs.

Sin embargo, la disponibilidad de datos ha sido un elemento determinante a la hora de decidir la cantidad de sectores de la muestra. Así, de los 47 sectores que presenta la ciudad de Valencia, sólo 29 ofrecían información con el suficiente detalle para poder aplicar el modelo. Aún con 29 DMUs se sigue cumpliendo la regla de Cooper.

La Tabla 3 muestra los datos disponibles para la selección y creación de variables. Los datos se han normalizado debido a las grandes diferencias en el orden de magnitud de las variables utilizadas. Todas las variables económicas se actualizaron en 2016 y se deflactaron.

Tabla 3: Descripción de las variables							
Presión (m.c.a)		Energía (kW)		Costes de O&M (€)		Caudal suministrado (m ³ /h)	
Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
102.83	16.63	13,014.20	14,162.93	5,919.18	5,602.55	218.80	236.88
Fugas (m ³ /h)		Variación de la Turbidez		Variación del Cloro Residual		Longitud de tubería (Km)	
Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
55.325	58.225	0.695	0.4375	1.3	0.46	17.91	15.14

Fuente: Elaboración propia a partir de la información disponible

Para analizar la posible relación entre las posibles variables se utiliza el coeficiente de correlación de Spearman puesto que no tiene por qué existir una relación lineal entre las variables. Los resultados de este coeficiente se ofrecen en la Tabla 4

Tabla 4: Coeficientes de Spearman

	Presión	Energía	Costes Operación y mantenimiento	Caudal	Usuarios	Fugas / Long de tubería	Turbidez	Cloro libre residual	Caudal / usuarios	Fugas	Costes Operación y Mantenimiento / fugas
Presión	1	0.263	-0.185	0.289	0.345	0.086	-0.1	-0.307	-0.375	0.118	-0.233
Energía	0.263	1	0.629	0.995	0.928	0.31	-0.413	-0.414	-0.24	0.953	-0.267
Costes Operación y mantenimiento	-0.185	0.629	1	0.637	0.533	0.196	-0.186	-0.017	0.166	0.691	0.323
Caudal	0.289	0.995	0.637	1	0.933	0.319	-0.419	-0.425	-0.256	0.949	-0.248
Usuarios	0.345	0.928	0.533	0.933	1	0.253	-0.375	-0.46	-0.465	0.867	-0.293
Fugas / Long de tubería	0.086	0.31	0.196	0.319	0.253	1	-0.009	-0.283	0.097	0.413	0.334
Turbidez	-0.1	-0.413	-0.186	-0.419	-0.375	-0.009	1	0.099	0.109	-0.305	0.327
Cloro libre residual	-0.307	-0.414	-0.017	-0.425	-0.46	-0.283	0.099	1	0.155	-0.321	0.168
Caudal / usuarios	-0.375	-0.24	0.166	-0.256	-0.465	0.097	0.109	0.155	1	-0.143	0.443
Fugas	0.118	0.953	0.691	0.949	0.867	0.413	-0.305	-0.321	-0.143	1	-0.202
Costes Operación y Mantenimiento / fugas	-0.233	-0.267	0.323	0.248	-0.293	0.334	0.327	0.168	0.443	-0.202	1

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la Tabla 4, en todos los trimestres existe una alta relación entre: caudal y usuarios, caudal y fugas, energía y presión, usuarios y fugas, y energía y fugas. Por tanto, esos pares de variables no deberían introducirse de modo simultáneo en el modelo.

En este sentido, las variables seleccionadas en el modelo son las que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Variables usadas en el WRDDM.		
<p>Inputs:</p> <p>Energía</p> <p>Costes de operación y mantenimiento / longitud de tubería del sector</p>	<p>Outputs deseados y no discrecional:</p> <p>Caudal suministrado / usuarios</p>	<p>Outputs no deseados:</p> <p>Fugas / longitud de tubería del sector</p> <p>Variación de la turbidez</p> <p>Variación del Cloro Libre residual</p>

Fuente: elaboración propia

Se opta por considerar a la energía como input en vez de la presión ya que es la variable que más se utiliza en la bibliografía consultada. Al mismo tiempo, se pretende incluir al usuario, la calidad de las aguas y la variable fugas dentro del modelo con el fin de obtener un resultado que englobe el conjunto de variables que influyen a la hora de definir la calidad de un abastecimiento. El output deseado, es no discrecional puesto que el gestor no puede modificar su nivel al tener que abastecer la demanda que los usuarios requieran.

5-. Resultados

En la Tabla 6 se pueden observar los resultados obtenidos. Para la correcta interpretación de los resultados, hay que tener en cuenta que, el 0 indica que el sector es eficiente y cuanto más alejado del 0 mayor es la ineficiencia.

Tabla 6: Resultados eficiencia anual.	
DMU	Eficiencia
1	0.24
2	0.42
3	0.12
4	0.08

5	0.08
6	0.00
7	0.46
8	0.20
9	0.19
10	0.35
11	0.15
12	0.44
13	0.19
14	0.00
15	0.20
16	0.00
17	0.00
18	0.36
19	0.32
20	0.30
21	0.44
22	0.00
23	0.50
24	0.20

25	0.21
26	0.00
27	0.18
28	0.50
29	0.00

Fuente: Elaboración propia.

De las 29 DMUs analizadas se observa que sólo el 24% son eficientes. Por tanto, la mayoría de los sectores no son eficientes y por ello tanto muestran capacidad de mejorar con el fin de llegar a serlo.

Para analizar las unidades ineficientes y ver si hay diferencias entre ellas, en la Tabla 7 se muestran los resultados de las DMUs ineficientes divididos en 4 categorías, desde el valor mínimo hasta el máximo (0.500).

Tabla 7: Clasificación de las DMUS analizadas según su valor de ineficiencia anual (%)	
> 0.000 y ≤ 0.125	17%
>0.125 y ≤ 0.250	39%
> 0.250 y ≤ 0.375	17%
> 0.375 y ≤ 0.500	26%

Fuente: Elaboración propia.

De las 23 unidades ineficientes el 17% presenta ineficiencias menores de 0.125 frente al 39% que presenta ineficiencias superiores a 0.125 e inferiores a 0.250 siendo este el grupo más numeroso. El 43% restante presenta ineficiencias más elevadas, lo que indica que hay capacidad de reducir la ineficiencia en cada sector.

Con el fin de conocer a qué se debe la ineficiencia, el modelo WRDDM, además de indicar la eficiencia global, obtiene los valores de eficiencia de cada variable tal y como

se observa en la Tabla 8. Esto es de especial interés para conocer en qué variable hay que actuar o priorizar la actuación para mejorar la eficiencia.

Tabla 8: Resultados por variables						
	Inputs		Output deseado	Outputs no deseados		
Sector	Energía	Costes de operación y mantenimiento / longitud de tubería del sector	Caudal suministrado / usuarios	Fugas / longitud de tubería del sector	Variación de la turbidez	Variación del Cloro Libre residual
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.911	0.217	0.000	0.309	0.477	0.206
3	0.186	0.025	0.000	0.339	0.000	0.130
4	0.694	0.241	0.000	0.069	0.203	0.294
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	0.849	0.429	0.000	0.200	0.778	0.403
8	0.532	0.202	0.000	0.000	0.514	0.079
9	0.019	0.500	0.000	0.493	0.487	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.166	0.245	0.000	0.503	0.195	0.119
12	0.760	0.396	0.000	0.492	0.309	0.000
13	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

17	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
18	0.602	0.058	0.000	0.256	0.197	0.349
19	0.633	0.593	0.000	0.627	0.693	0.000
20	0.761	0.280	0.000	0.177	0.310	0.398
21	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
22	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
23	0.787	0.403	0.000	0.733	0.552	0.000
24	0.741	0.460	0.000	0.055	0.377	0.272
25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
26	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
27	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
28	0.883	0.379	0.000	0.420	0.600	0.476
29	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia

En este caso, los valores de ineficiencia indican la capacidad potencial de ahorro de inputs, de disminución de outputs no deseados y/o de incremento de outputs deseados. Los resultados ponen de manifiesto que, el 48% de las DMUs analizadas presentan potencialidades de ahorro en los inputs, tanto en energía como en Costes de operación y mantenimiento / longitud de tubería del sector. Sin embargo, en cuanto a los outputs no deseados, el 45% de las DMUs analizadas presentan capacidad de mejora reduciéndolos. En este caso sí que se observa una diferencia entre los distintos outputs no deseados: el 45% de las DMUs analizadas presentan capacidad de disminuir el output no deseado fugas por unidad de longitud y variación de la turbidez frente al 34% de DMUs que presentan capacidad de mejora al disminuir el output no deseado de variación de cloro.

La Tabla 9 muestra un resumen los resultados anuales de todos las DMUs con los principales estadísticos.

Tabla 9: resumen anual de la eficiencia por variables

	Energía	Costes de operación y mantenimiento / longitud de tubería del sector	Caudal suministrado / usuarios	Fugas / longitud de tubería del sector	Variación de la turbidez	Variación del Cloro Libre residual
min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Max	0.92	0.78	0.00	0.82	0.61	0.43
medio	0.31	0.20	0.00	0.26	0.17	0.08
SD	0.35	0.25	0.00	0.29	0.20	0.13

Fuente: Elaboración propia

La capacidad de ahorro de los inputs pone de manifiesto que la energía presenta mayor capacidad de ahorro frente a los costes de operación y mantenimiento por unidad de longitud. Esto indica que se deben tomar medidas para bien mejorar la eficiencia energética o buscar de disminuir el precio con el fin de mejorar la eficiencia. A su vez, la capacidad de ahorro en los costes de operación y mantenimiento no hay que entenderla como no realizar el correcto mantenimiento de la red distribución o disminuir la partida económica, sino que indica que se debe buscar un mantenimiento preventivo en vez de uno correctivo con el fin de reducir el número de reparaciones y así disminuir costes.

De los outputs no deseados, la variable que más se debe reducir para mejorar la eficiencia es las fugas por unidad de longitud. Esto indica la importancia que tiene esta variable en la eficiencia en la correcta gestión de la red. De los dos parámetros de calidad de las aguas considerados como outputs no deseados, la turbidez presenta mayor capacidad de disminución que la variación del cloro libre residual. Esto puede ser debido a que el cloro se adiciona en el tratamiento de manera que se cumpla el valor en red necesario mientras que la turbidez presenta relación con el número de fugas y la distancia del sector frente a la planta. Por tanto, una disminución en las fugas mejorará en la variación de turbidez.



Por tanto, con los resultados obtenidos para mejorar la eficiencia de las DMUs analizadas, es decir, de los sectores que forman de la red de la ciudad de Valencia, se pone de manifiesto que las principales variables en las que se debe actuar para mejorar la eficiencia es en el input energía para mejorar la capacidad de ahorro y en el output no deseado fugas por unidad de longitud.

6-. Conclusiones

La gestión de las redes de abastecimiento se trata de un proceso complejo por la cantidad de variables y objetivos que intervienen para ofrecer el mejor servicio con el menor de los costes. Por ello, se utilizan DSS con el fin de orientar la decisión y optimizar los recursos a la hora de su gestión.

El objetivo de la comunicación es aplicar el modelo WRDDM en las redes de abastecimiento con el fin de desarrollar un DSS aplicando un modelo DEA Russell mediante la aplicación en un caso de estudio en la ciudad de Valencia durante el año 2016. Se optó por este modelo ya que no sólo da la eficiencia global de cada unidad, sino que indica la eficiencia por variables lo que ayuda a identificar cuáles son las variables que generan la ineficiencia.

Se seleccionaron las variables de manera que fuesen obtenibles y representativos de las redes de distribución tal y como en la literatura consultada recomienda, y se categorizaron en inputs, outputs deseados y outputs no deseados, siendo estos: Inputs: Energía, Costes de operación y mantenimiento / longitud de tubería del sector; Outputs deseados: Caudal suministrado / usuarios; y Outputs no deseados: Fugas / longitud de tubería del sector, Variación de la turbidez, Variación del Cloro Libre residual.

Los resultados muestran que el 79% de las DMUs analizadas presentan capacidad de mejora para ser eficientes. En cuanto se analiza las variables que generan las ineficiencias se pone de manifiesto que la energía y las fugas por unidad de longitud son las variables que mayor ineficiencia generan y, por tanto, es donde se debe actuar prioritariamente para mejorar la eficiencia de cada sector de la red de distribución.



7-. Referencias

AEAS (Asociación española de abastecimientos de agua y saneamiento) (2016), XVI: *Estudio nacional. Suministro de agua potable y saneamiento en España*.

Aguirre, A. (1996): “Ingeniería Hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua”, Vol. I, eds. U.D. *Mecánica de Fluidos* - Universidad Politécnica de Valencia - Aguas de Valencia S.A., Valencia, España.

Alegre, H., Coelho, S., Covas, Didia I C, Almeida, M. and Cardoso, A., (2013). “A utility-tailored methodology for integrated asset management of urban water infrastructure”. *Water science & technology. Water supply*. November 2013. Vol. 13, no. 6, p. 1444–1451. DOI 10.2166/ws.2013.108.

Barros, C.P., Managi, S., Matousek, R., (2012). “The technical efficiency of the Japanese banks: non-radial directional performance measurement with undesirable output”. *Omega* 40 (1), 1e8.

Cabrera, E., Espert, V., Cabrera Marcet, E. and Espert, V., (1993). “Panorámica general de los abastecimientos de agua”. El caso de España. In: *Abastecimientos de agua urbanos: estado actual y tendencias futuras*. Valencia: F. Piera, S.L. p. 21–40. ISBN 84-482-0200-7.

Cai, Y., Yue, W., Xu, L., Yang, Z. and Rong, Qi., (2016). “Sustainable urban water resources management considering life-cycle environmental impacts of water utilization under uncertainty”. *Resources, Conservation and Recycling* [online]. Vol. 108, p. 21–40. DOI 10.1016/j.resconrec.2016.01.008. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.008>

Choi, T., Kang, K. and KOO, J., (2015). “Efficiency Evaluation of Leakage Management Using Data Envelopment Analysis”. *Journal - American Water Works Association*. January 2015. Vol. 107, no. 1, p. E1–E11. DOI 10.5942/jawwa.2015.107.0002.

Christodoulou, S. and Deligianni, Al., (2010). “A Neurofuzzy Decision Framework for the Management of Water Distribution Networks”. *Water Resources Management*. 2010. Vol. 24, no. 1, p. 139–156. DOI 10.1007/s11269-009-9441-2.



Chung, Y.H., Feare, R., Grosskopf, S., (1997). “Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach”. *J. Environ. Manag.* 51 (3), 229e240.

Cooper, W.W., Seiford, L.M., Tone, K., (2007). “*Data Envelopment Analysis: a Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-solver Software*”. Springer, New York.

Fujii, H., Managi, S., Matousek, R., (2014). “Indian bank efficiency and productivity changes with undesirable outputs: a disaggregated approach”. *J. Bank. Finance* 38 (1), 41e50.

Gurung, Th., Stewart, R., Beal, C., and Sharma, A., (2015). “Smart meter enabled water end-use demand data: Platform for the enhanced infrastructure planning of contemporary urban water supply networks”. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2015. Vol. 87, no. 1, p. 642–654. DOI 10.1016/j.jclepro.2014.09.054. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.054>

Hernández-Muñoz, A. and Colegio de caminos canales y puertos, (2008). *Abastecimiento y Distribución de Agua*. 5a Rev y a. España: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. ISBN 978 - 84 - 380 - 0390 - 9.

Jeong, H., Minne, El., and Crittenden, J., (2015). “Life cycle assessment of the City of Atlanta, Georgia’s centralized water system”. *International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 20, no. 6, p. 880–891. DOI 10.1007/s11367-015-0874-y.

Kanakoudis, V., Tsitsifli, S. and Demetriou, G., (2013). “Presenting a new set of indicators for urban water pipe networks performance assessment: from theory to practice”. *3rd Internacional Conference on Water Economics, Statistics and Finance*. 2013.

Kanakoudis, V., Tsitsifli, S., Cerk, M., Banovec, P., Samaras, P. and Zouboulis, A.I., (2015). “Basic Principles of a DSS Tool Developed to Prioritize NRW Reduction Measures in Water Pipe Networks”. *Water Quality, Exposure and Health* [online]. 2015. Vol. 7, no. 1, p. 39–51. DOI 10.1007/s12403-014-0111-0. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s12403-014-0111-0>

Loubet, P., Roux, P., Guérin-Schneider, L. and Bellon-Maurel, V., (2016). “Life cycle assessment of forecasting scenarios for urban water management: A first



implementation of the WaLA model on Paris suburban area”. *Water Research*. 2016. Vol. 90, p. 128–140. DOI 10.1016/j.watres.2015.12.008.

Loubet, P., Roux, P., Loiseau, E. and Bellon-Maurel, V., (2014). “Life cycle assessments of urban water systems : A comparative analysis of selected peer-reviewed literatura”. *Water Research* [online]. 2014. Vol. 67, no. 0, p. 187–202. DOI 10.1016/j.watres.2014.08.048. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.048>

Menke, R., Abraham, E., Parpas, P. and Stoianov, I., (2016). “Demonstrating demand response from water distribution system through pump scheduling”. *Applied Energy* [online]. 2016. Vol. 170, p. 377–387. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.02.136. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.136>

Molinos-Senante, M., Gémar, G., Gómez, T., Caballero, R. and Sala-Garrido, R., (2016). “Eco-efficiency assessment of watwater treatment plants using a wighted Russell directional distance model”. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 164, p. 1066–1075. DOI 10.1016/j.jclepro.2017.06.198.

Molinos-Senante, M., Sala-Garrido, R., Hern_andez-Sancho, F., (2016^a). “Development and application of the Hicks-Moorsteen productivity index for the total factor productivity assessment of wastewater treatment plants”. *J. Clean. Prod.* 112,

Mutikanga, H., Sharma, S. and Vairavamoorthy, K., (2011). “Multi-criteria Decision Analysis: A Strategic Planning Tool for Water Loss Management”. *Water Resources Management*. 2011. Vol. 25, no. 14, p. 3947–3969. DOI 10.1007/s11269-011-9896-9.

Pardo-Picazo, M., Cabrera-Macset, E. and Cobacho, R., (2010). *Influencia de los costes del Agua y la Energía en la renovación de tuberías*. Universidad Politécnica de Valencia.

Qu, Ji., Meng, X. and You, H., (2016). “Multi-stage ranking of emergency technology alternatives for water source pollution accidents using a fuzzy group decision making tool”. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2016. Vol. 310, p. 68–81. DOI 10.1016/j.jhazmat.2016.01.067. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.067>



Scholten, L., Scheidegger, A., Reichert, P. and Mauer, M., (2013). “Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis”. *Water Research* [online]. 2013. Vol. 49, p. 124–143. DOI 10.1016/j.watres.2013.11.017. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.11.017>

Wei, C., Leoschel, A., Liu, B., (2015). “Energy-saving and emission-abatement potential of Chinese coal-fired power enterprise: a non-parametric analysis”. *Energy Econ.* 49, 33e43.

Zhou, P., Zhou, X., Fan, L.W., (2014). “On estimating shadow prices of undesirable outputs with efficiency models: a literature review”. *Appl. Energy* 130, 799e806.