



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA

TESIS DOCTORAL

**Selección de un sistema de desinfección en proyectos
de reutilización de las aguas residuales tratadas.**

Presentada por:

Marco Antonio Cuenca Ruiz

Dirigida por:

Dr. Jorge Curiel Esparza

Dr. Julián Cantó Perelló

Dr. Manuel Guzmán Martín Utrillas

Valencia, Septiembre de 2015.

A Carmen y Eva

A mis padres y hermanos

RESUMEN

El desarrollo económico suele implicar la necesidad de disponer de recursos hídricos adicionales para poder llevar a cabo las nuevas actividades industriales o agrícolas, o para abastecer la demanda correspondiente a las actividades domésticas, turísticas y de ocio. Además, este desarrollo conlleva habitualmente un aumento de población, lo que aún incrementa más la demanda de agua. En muchos lugares de clima árido o semiárido esta escasez de recursos hídricos ocasiona una disminución de la calidad del agua, incluso en lugares con lluvia suficiente la acumulación de la demanda en el tiempo y en el espacio crea deficiencias, y genera repercusiones sociales al respecto del destino de los recursos disponibles y su afectación al medio ambiente.

Las aguas residuales regeneradas constituyen un recurso no convencional de agua que ha venido desarrollándose en los últimos decenios. No obstante, para poder proceder a reutilizar este recurso, de gran importancia por su volumen y disponibilidad, se requieren las tecnologías adecuadas y en particular unos sistemas de desinfección eficientes.

Esta tesis presenta una aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) mediante la integración de un proceso Delphi y combinado con la técnica VIKOR, para la selección de la mejor tecnología de desinfección en proyectos de reutilización y regeneración de aguas residuales tratadas. La metodología propuesta proporciona a los administradores de proyectos una herramienta para evaluar problemas con criterios múltiples y múltiples alternativas que implican criterios de decisión no cuantificables, con opiniones de expertos que juegan un papel importante en la selección de estas alternativas de tratamiento. Las alternativas han sido evaluadas para cada uno de los criterios, ponderados de acuerdo a las opiniones de los expertos consultados. Finalmente, se aplica el método VIKOR para determinar una solución de compromiso, y establecer la estabilidad de los resultados.

Por tanto, el sistema experto propuesto para seleccionar la alternativa óptima de desinfección es un método híbrido que combina el procedimiento AHP con el método Delphi y la técnica VIKOR, y se muestra apropiado en escenarios realistas donde múltiples actores están involucrados en la selección de una técnica de desinfección sostenible en proyectos de regeneración de aguas residuales tratadas.

ABSTRAC

Economic development often involves the need for additional water resources to carry out the new industrial or agricultural activities, or to supply the domestic, tourist and leisure activities demand. Moreover, this development usually leads to increased in population, which further increases the demand for water. In many places with arid or semiarid climate, this water scarcity leads to decreased water quality, even in areas with rainfall, the accumulation of demand in time and in space causes deficits, and produces social impact about the destination of available resources and damages to the environment.

The reclaimed wastewaters are an unconventional source of water that has developed in recent decades. However, in order to reuse this resource, very important because of the quantity and the availability, appropriate technologies are required, specially an efficient disinfection system.

This doctoral thesis presents an application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) by integrating a Delphi process and combined with the VIKOR technique for selecting the best disinfection technology for treated wastewater reuse projects. The proposed methodology provides project managers a tool to evaluate problems with multiple criteria and multiple alternatives which involve non-commeasurable decision criteria, with expert opinions play playing a major role in the selection of these treatment alternatives. The alternatives have been evaluated for each of the criteria weighted according to the opinions of the experts consulted. Finally, the VIKOR method has been applied to determine a compromise solution, and to establish the stability of the results.

Therefore, the expert system proposed to select the optimal disinfection alternative is a hybrid method combining the AHP with the Delphi method and the VIKOR technique, which is shown to be appropriate in realistic scenarios where multiple stakeholders are involved in the selection of a sustainable disinfection technique for wastewater reuse projects.

RESUM

El desenvolupament econòmic sol implicar la necessitat de disposar de recursos hídrics addicionals per a poder dur a terme les noves activitats industrials o agrícoles, o per a abastir la demanda corresponent a les activitats domèstiques, turístiques i d'oci. A més, aquest desenvolupament comporta habitualment un augment de població, la qual cosa encara incrementa més la demanda d'aigua. En molts llocs de clima àrid o semi àrid esta escassetat de recursos hídrics ocasiona una disminució de la qualitat de l'aigua, fins i tot en llocs amb pluja suficient l'acumulació de la demanda en el temps i en l'espai crega deficiències, i genera repercussions socials respecte d'això del destí dels recursos disponibles i la seua afectació al medi ambient.

Les aigües residuals regenerades constitueixen un recurs no convencional d'aigua que ha vingut desenvolupant-se en els últims decennis. No obstant això, per a poder procedir a reutilitzar aquest recurs, de gran importància pel seu volum i disponibilitat, es requereixen les tecnologies adequades i en particular uns sistemes de desinfecció eficients.

Esta tesi presenta una aplicació del Procés Analític Jeràrquic (AHP) per mitjà de la integració d'un procés Delphi i combinat amb la tècnica VIKOR, per a la selecció de la millor tecnologia de desinfecció en projectes de reutilització i regeneració d'aigües residuals tractades. La metodologia proposada proporciona als administradors de projectes una ferramenta per a avaluar problemes amb criteris múltiples i múltiples alternatives que impliquen criteris de decisió no quantificables, amb opinions d'experts que juguen un paper important en la selecció d'estes alternatives de tractament. Les alternatives han sigut avaluades per a cada un dels criteris ponderats d'acord amb les opinions dels experts consultats. Finalment, s'aplica el mètode VIKOR per a determinar una solució de compromís, i establir l'estabilitat dels resultats.

Per tant, el sistema expert proposat per a seleccionar l'alternativa òptima de desinfecció és un mètode híbrid que combina el procediment AHP amb el mètode Delphi i la tècnica VIKOR, i es mostra apropiat en escenaris realistes on múltiples actors estan involucrats en la selecció d'una tècnica de desinfecció sostenible en projectes de regeneració d'aigües residuals tractades.

ÍNDICES.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1:	INTRODUCCIÓN.....	21
CAPÍTULO 2:	TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES ..	27
2.1.	Breve historia del tratamiento de las aguas residuales.	27
2.2.	Características de las aguas residuales.....	39
2.3.	Fundamentos básicos del tratamiento de aguas residuales urbanas. ...	45
2.4.	Tratamientos avanzados para la reutilización de aguas residuales.	58
CAPÍTULO 3:	PROPUESTA METODOLÓGICA.....	89
3.1.	El método Delphi	89
3.2.	El método AHP.....	97
3.3.	El método VIKOR	110
CAPÍTULO 4:	APLICACIÓN PRÁCTICA.....	115
4.1.	Fase preliminar: La definición del árbol jerárquico.....	115
4.2.	Fase 1: La evaluación de criterios y alternativas.	125
4.3.	Fase 2: Solución de compromiso y análisis de estabilidad.....	148
CAPÍTULO 5:	CONCLUSIONES.....	155
CAPÍTULO 6:	REFERENCIAS.....	161
ANEXO:	PUBLICACIÓN.....	173

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.- Obras de ampliación y tratamiento terciario de la EDAR de Castellón.....	21
Ilustración 2.- Tecnologías de desinfección.....	22
Ilustración 3.- Usos del agua regenerada.....	23
Ilustración 4.- Canalizaciones en Mohenjo-Daro.....	28
Ilustración 5.- Letrina en Knossos (Creta).....	28
Ilustración 6.- Tuberías de terracota.....	29
Ilustración 7.- Letrinas Romanas.....	29
Ilustración 8.- Cloaca Maxima.....	30
Ilustración 9.- Salida de la Cloaca Maxima.....	30
Ilustración 10.- Sátira de la revista Punch, que demuestra la contaminación del río Támesis en 1858 con el título de "La carretera en silencio hombre (Föhl & Hamm, 1985).....	31
Ilustración 11.- Sir Edwin Chadwick.....	33
Ilustración 12.- Fosa séptica Foie Mouras.....	34
Ilustración 13.- Modificación del tanque séptico original propuesto por Mouras.....	35
Ilustración 14.- Tanque séptico de Donald Cameron. (Fuente: www.teecsa.com).....	35
Ilustración 15.- Fuentes de Contaminación. (Fuente: Hernández Muñoz, 2001). ..	40
Ilustración 16.- Vertido industrial.....	42
Ilustración 17.- Elementos constituyentes de las instalaciones para el tratamiento de las aguas residuales urbanas (Centa, 2006). ..	45
Ilustración 18.- Configuración típica de una planta convencional de tratamiento de aguas residuales.....	47
Ilustración 19.- Pozo de gruesos.....	48
Ilustración 20.- Reja de desbaste automática.....	48
Ilustración 21.- Rototamiz.....	49

Ilustración 22.- Desarenador-desengrador aireado.	50
Ilustración 23.- Decantador Primario.	51
Ilustración 24.-Parrilla de difusores en reactor biológico.	52
Ilustración 25.- Esquema de Tratamiento Secundario en la depuración de las aguas residuales urbanas.....	53
Ilustración 26.- Canal de Cloración.....	54
Ilustración 27.- Espesador de fangos por flotación.....	55
Ilustración 28.- Digestor Anaerobio para estabilización de fangos.....	55
Ilustración 29.- Equipo de acondicionamiento químico de lodos.	56
Ilustración 30.- Decantadora Centrífuga.	56
Ilustración 31.- Esquema típico del horno donde se lleva a cabo la incineración..	57
Ilustración 32.- Riego de zonas públicas.....	59
Ilustración 33.- Protección Contra incendios	60
Ilustración 34.- Sistema tipo de refrigeración.	61
Ilustración 35.- Industria papelera.	62
Ilustración 36.- Riego agrícola.	62
Ilustración 37.- Humedales naturales y/o artificiales.....	65
Ilustración 38.- Estanques artificiales.....	65
Ilustración 39.- Recarga de acuíferos mediante canales de infiltración.....	67
Ilustración 40.- estación de regeneración avanzada de Goreangab (Namibia).	70
Ilustración 41.- Laberinto de cloración de una EDAR.....	74
Ilustración 42.- Proceso de generación del ozono (Fernández Troyano, 2014).....	76
Ilustración 43.- Módulo de desinfección UV.	78
Ilustración 44.- Esquema de un reactor UV.....	80
Ilustración 45.- Diagrama conceptual de un sistema de separación por membranas (P1>P2). (González Gálvez, 2007).	82

Ilustración 46.-Espectro de filtración. (Fuente: http://procesosbio.wikispaces.com)	82
Ilustración 47.- Humedal Artificial de juncos.	84
Ilustración 48.- Humedal Artificial de Flujo Libre.	86
Ilustración 49.- Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal.....	86
Ilustración 50.- Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical.	87
Ilustración 51.- Oráculo de Delfos en Grecia.....	90
Ilustración 52.- Etapas básicas de la técnica Delphi	96
Ilustración 53.- Thomas Saaty.	99
Ilustración 54.- Diagrama tipo de jerarquías.....	103
Ilustración 55. Años de experiencia laboral de los expertos.....	116
Ilustración 56.- Procedencia laboral de los expertos consultados.	116
Ilustración 57.- Estructura jerárquica del modelo.....	119
Ilustración 58.- Tipología de los criterios adoptados.	122
Ilustración 59.- Esquema del procedimiento de la Fase Preliminar	124
Ilustración 60.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Fiabilidad del Sistema"	135
Ilustración 61.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Simplicidad Operacional"	136
Ilustración 62.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Eficiencia en la Reducción de Patógenos".	137
Ilustración 63.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Costo de Capital".	138
Ilustración 64.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Costes de Operación y Mantenimiento".	139
Ilustración 65.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Tratamientos Adicionales".....	140
Ilustración 66.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Impactos Ambientales".....	141

Ilustración 67.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Uso de Recursos Naturales" 142

Ilustración 68.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Riesgos de Seguridad" 143

Ilustración 69.- Resultado global de prioridades de las alternativas..... 145

Ilustración 70.- Esquema del procedimiento de la Fase 1 (a) 146

Ilustración 71.- Esquema del procedimiento de la Fase 1 (b) 147

Ilustración 72.- Esquema del procedimiento de la Fase 1 (c)..... 148

Ilustración 73.- Pesos de cada criterio con respecto al objetivo global. 156

Ilustración 74.- Pesos de cada alternativa técnica para cada criterio. 157

Ilustración 75.- Prioridades Globales para cada una de las alternativas de desinfección..... 158

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Composición típica de las aguas residuales urbanas (Metcalf & Eddy, 1995).

Tabla 2.- Requisitos de los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas (DIRECTIVA 91/271/CEE)

Tabla 3.- Agentes potencialmente infecciosos presentes en aguas residuales domésticas no tratadas

Tabla 4.- Principales Tecnologías de Regeneración.

Tabla 5.- Escala fundamental propuesta por Saaty para comparaciones por pares (Saaty, 2012).

Tabla 6.- Esquema general de la matriz de comparación por pares de los criterios.

Tabla 7.- Valor máximo de CR admisible (MCR).

Tabla 8.- Índice de consistencia aleatorio (RCI).

Tabla 9.- Segundo cuestionario: Evaluación de los criterios.

Tabla 10.- Resultados de la evaluación de los criterios.

Tabla 11.- Matriz de comparación por pares de los criterios (A).

Tabla 12.- Matriz de comparación por pares de los criterios normalizada (A_N).

Tabla 13.- Vector de prioridades (ω).

Tabla 14.- Peso relativo de los criterios.

Tabla 15.- Tercer cuestionario: Evaluación de las Alternativas.

Tablas 16-24.- Resultados de las evaluaciones de las alternativas.

Tablas 25-33.- Vector de prioridades y análisis de la consistencia de la matriz de comparación por pares de las alternativas para cada criterio.

Tabla 34.- Matriz de Vectores Prioritarios de las Alternativas.

Tabla 35.- Resultado global de prioridades.

Tabla 36.- Resultado global de prioridades

Tabla 37.- Resultado de valores S_i y R_i .

Tabla 38.- Resultado de valores Q_j .

Tabla 39.- Ranking de preferencia de las tecnologías de desinfección.

LISTA DE SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

A	Matriz de comparación por pares
a.C.	Antes de Cristo
ADN	Ácido Desoxirribonucleico
AHP	Proceso Analítico Jerárquico (del inglés Analytical Hierarchy Process)
ARN	Ácido Ribonucleico
AT	Tratamientos Adicionales (del inglés Additional Treatments)
CaCO ₃	Carbonato de Calcio
CC	Costo de Capital (del inglés Capital Cost)
CEE	Comunidad Económica Europea
CLH	Cloración (del inglés Chlorination)
cm	Centímetro/s
COT	Carbono Orgánico Total
CR	Razón o Ratio de Consistencia (del inglés Consistency Ratio)
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno (transcurridos cinco días de reacción)
DMA	Directiva Marco del Agua
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EDAR	Estación Depuradora de Aguas Residuales
EI	Impactos ambientales (del inglés Environmental Impacts)
EP	Eficiencia en la Reducción de microorganismos Patógenos (del inglés Efficiency in reducing Pathogenic microorganisms)

EPA	Agencia de Protección Medioambiental (del inglés Environmental Protection Agency)
l	Litro/s
m	Metro/s
MCDA	Análisis de Decisión Multicriterio (del inglés Multiple Criteria Decision Analysis)
MCDM	Métodos de Decisión Multicriterio (del inglés Multiple Criteria Decision Making)
MCR	Valor máximo del Ratio de Consistencia (del inglés Maximum Consistency Ratio)
MFI	Filtración por Membranas (del inglés Membrane Filtration)
mg	Miligramo/s
mm	Milímetro/s
MTH	Metanos Trihalogenados
N	Nitrógeno
nm	Nanómetro/s
NR	Uso de Recursos Naturales (del Inglés use of Natural Resources)
NSY	Sistemas Naturales (del inglés Natural SYstems)
O.D.	Oxígeno Disuelto
O ₂	Oxígeno (molécula de oxígeno)
O ₃	Ozono
°F	Grados Fahrenheit
OM	Coste de Operación y Mantenimiento (del inglés Operation and Maintenance cost)

OS	Simplicidad Operacional (del inglés Operational simplicity)
OZO	Ozonización (del inglés Ozonation)
P	Fósforo
pH	Coficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa
RAND	Corporación estadounidense para la investigación y el desarrollo (del inglés Research ANd Development)
RCI	Índice de Consistencia Aleatorio (del inglés Random Consistency Index)
RS	Fiabilidad del Sistema (del inglés Reliability of the System)
spp.	Referido a todas las especies (del inglés species)
SR	Riesgos de Seguridad (del inglés Safety Risk)
SS	Sólidos Suspendidos
SST	Sólidos Suspendidos Totales
sum	Suma o sumatorio
UV	Ultravioleta
UVR	Radiación Ultravioleta (del inglés UltraViolet Radiation)
VIKOR	Optimización Multicriterio y Solución de Compromiso (del serbio VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje)
vs	Entendido como "frente a" (del latín "versus")
λ	Autovector
λ_{\max}	Autovalor máximo
μm	Micrómetro/s
ω	Vector de Prioridades

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.

La Directiva Marco del Agua (DMA) tiene el ambicioso objetivo de lograr, antes del año 2016, un buen estado cualitativo y cuantitativo de todas las masas de agua, ríos, lagos, aguas subterráneas y aguas costeras de Europa, de acuerdo con los plazos definidos y con los diferentes programas (European_Union, 2000). Además, la DMA comprometió a los Estados miembros de la Unión Europea a presentar sus planes hidrológicos de cuenca de la Comisión Europea en marzo de 2010 (Scholz, 2013). Entre las acciones de respuesta a estas demandas, la DMA alienta a los Estados miembros a dirigir sus esfuerzos hacia la reutilización de aguas residuales (Lazarova, et al., 2012).

La reutilización de aguas residuales se está convirtiendo en un objetivo especialmente importante en aquellas zonas donde el recurso agua es cuantitativa y cualitativamente escaso (Gomez-Lopez, et al., 2009). Por otro lado, la DMA también proporciona las bases para lograr un uso sostenible del agua a largo plazo, teniendo en cuenta las consideraciones ambientales, económicas y sociales (Udias, et al., 2010).



Ilustración 1.- Obras de ampliación y tratamiento terciario de la EDAR de Castellón.

La selección de un tratamiento sostenible de las instalaciones de reutilización de aguas residuales representa un serio desafío para los administradores de proyectos, así como para otros grupos de interés y actores involucrados en la toma de decisiones del proceso (Curiel-Esparza & Canto-Perello, 2012). Una de las instalaciones principales en una planta de regeneración de aguas residuales tratadas, es la correspondiente al tratamiento de desinfección.

Hay varios factores que determinan cuál es la tecnología de tratamiento de desinfección más adecuada. Estos factores dependen de las necesidades y características de cada sitio especial, por lo que pueden ser diferentes de un lugar a otro. Así, debido a las diferencias contextuales que existen entre los países, una tecnología apropiada para un sitio específico puede no ser adecuada para otro. La complejidad del problema se deriva de la existencia de una serie de factores que influyen en la selección de la tecnología más óptima (Singhirunnusorn & Stenstrom, 2009). La selección de esta tecnología de desinfección idónea debería ser estudiada específicamente para cada planta de tratamiento.



Ilustración 2.- Tecnologías de desinfección.

Por otra parte, los tomadores de decisiones tienen una dificultad añadida, ya que deben tener en cuenta al mismo tiempo diferentes factores, tales como el costo del tratamiento, los objetivos de calidad del agua y los objetivos de sostenibilidad. Por lo tanto, los criterios tangibles deben ser analizados conjuntamente con los intangibles.

Esta tesis tiene como objetivo el aportar una novedosa metodología que permita conjugar esos criterios tangibles e intangibles en la toma de decisiones para la selección de una tecnología óptima de desinfección de aguas residuales tratadas.

Cada tecnología de regeneración tiene ciertas características y la elección de la tecnología adecuada para cada proyecto de reutilización debe ser hecha en función de muchos factores, entre los que se incluyen: la calidad y el volumen de agua a regenerar, la calidad que se debe alcanzar para su posterior uso, los costos de capital, los costes de operación y mantenimiento, los requerimientos de suelo para la implantación, la fiabilidad y los criterios ambientales y sociales, entre otros. Es por ello que la técnica más adecuada será aquella que proporcione un mayor rendimiento a menor costo, pero no únicamente, sino que también se debe tener en cuenta que sea sostenible en términos de satisfacción de las necesidades locales.



Ilustración 3.- Usos del agua regenerada.

La metodología que se propone en la presente tesis, integra el proceso analítico jerárquico (AHP, del inglés Analytical Hierarchy Process) con el método Delphi y la técnica VIKOR, proporcionando a los administradores de proyectos una herramienta para evaluar problemas con múltiples criterios y múltiples alternativas que implican factores de decisión no tangibles o no cuantificables (Curiel-Esparza, et al., 2004).

Una leve revisión de la bibliografía existente, nos muestra que otras técnicas de análisis de decisión multicriterio (MCDA, del inglés Multiple Criteria Decision Analysis) han sido aplicadas recientemente en el campo de las infraestructuras de aguas residuales. Algunas de ellas han estado dirigidas a resolver el problema de la ubicación de una planta de tratamiento de aguas residuales utilizando metodologías basadas en el proceso analítico jerárquico bajo fuzzy (Kaya, 2011), o mediante el uso de la técnica fuzzy para el orden de preferencia por proximidad con una solución ideal (Yeonjoo, et al., 2013). También se pueden encontrar otras metodologías como Promethee V para ayudar a la toma de decisiones en la selección de alternativas de rehabilitación de redes de agua (Fontana & Morais, 2013), o metodologías que integran el proceso de jerarquía analítica y análisis en relación gris para la selección de las plantas de tratamiento de efluentes en curtidurías (Pophali, et al., 2011), o la aplicación de AHP con evaluación del ciclo de vida, ciclo de vigencia del costo, en la selección de tratamientos de aguas (Kalbar, et al., 2012), o la aplicación de la simulación de Monte Carlo para decidir el uso final del agua tratada (Jing, et al., 2013). No obstante, como se ha podido observar, la metodología propuesta no se identifica con ninguna de ellas ni se enfoca en ningún momento al problema de la selección de tecnologías de desinfección.

Como se ha indicado, el sistema experto que se desarrolla en la presente tesis, propone, para seleccionar el tratamiento óptimo de desinfección, un método híbrido que combina el AHP con el método Delphi y la técnica VIKOR. El procedimiento de AHP es capaz de hacer frente a los criterios económicos tradicionales junto con la sostenibilidad del sistema, la fiabilidad, los riesgos para la salud humana y para el medio ambiente, los aspectos sociales, y otros criterios no cuantificables numéricamente. La técnica Delphi se introduce para facilitar un panel de expertos eficiente del proceso dinámico. Por último, la técnica VIKOR encuentra una solución de compromiso que está más cerca de la ideal en el

proceso de toma de decisiones frente a criterios contradictorios y no cuantificables.

Las técnicas de desinfección, por tanto, se evalúan de acuerdo con todos los criterios establecidos y la solución de compromiso proporciona la máxima utilidad de la mayoría, y un mínimo rechazo de la alternativa oponente.

En resumen, esta tesis aporta un modelo híbrido para la selección de la mejor tecnología de desinfección en proyectos de reutilización de aguas residuales tratadas.

CAPÍTULO 2:

TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

CAPÍTULO 2: TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

2.1. Breve historia del tratamiento de las aguas residuales.

Desde que las sociedades pasaron de ser culturas nómadas a construir sitios más permanentes, la disposición de los residuos se ha convertido en una de las principales preocupaciones del ser humano que ha tratado de resolver de muy diversas maneras.

Debemos entender que hasta hace poco tiempo, el saneamiento de las aguas residuales estaba centrado en la protección sanitaria y en la reducción al mínimo de los riesgos de salud, sobre todo en lo relacionado con las enfermedades infecciosas. Posteriormente, se ha ido aumentando su alcance para incluir riesgos de salud crónicos y, más recientemente, las preocupaciones medioambientales (Burks & Minnis, 1994).

En el presente apartado se va a exponer como han ido evolucionando, a lo largo de la historia, los criterios en referencia al tratamiento de las aguas residuales, así como los principales avances tecnológicos habidos en cada época.

2.1.1. El mundo antiguo, 3500 a.C. a 500 d.C.

Durante el período neolítico (10.000 a.C.) el movimiento de las tribus nómadas, permitió que la propia tierra tratara los residuos generados de forma natural. Conforme se fueron formando agrupaciones poblacionales, las sociedades fueron desarrollando tecnologías básicas con el objetivo de minorar las molestias generadas por los residuos mediante una pronta evacuación de los mismos.

La ciudad de Ur, alrededor del 3500 a.C., tenía una población media de 65.000 personas por milla cuadrada (una alta densidad demográfica para la época). Los residuos generados, ya de cierta importancia, se trataban simplemente vertiéndolos a las calles, lo que provocaba que los niveles de las mismas se elevaran, requiriendo cada cierto tiempo levantar el nivel de las puertas de sus casas (Savas, 1977).

Las primeras evidencias de saneamiento urbano las encontramos en las ciudades de Harappa y Mohenjo-Daro del valle de Indo (actual Paquistán), cerca del 2500 a 1500 a.C. El planeamiento urbano de estas ciudades incluyó los primeros sistemas de saneamiento conocidos, compuestos por una red de cloacas de ladrillo revestido de betún, algunas lo suficientemente grandes como para que una persona pudiera caminar por su interior. Las casas vertían sus aguas residuales por medio de unos desagües revestidos con azulejos. El más llamativo de los edificios de Mohenjo-Daro es un gran baño o piscina, construido de ladrillo, que ocupa una superficie de unos 83 metros cuadrados (Blázquez, 1995).



Ilustración 4.- Canalizaciones en Mohenjo-Daro.

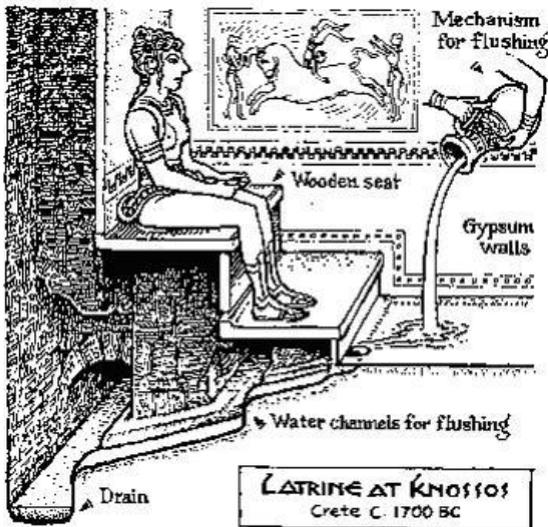


Ilustración 5.- Letrina en Knossos (Creta).

Fueron los griegos los primeros en entender la relación existente entre la calidad del agua y la salud pública. La cultura Minoan en la isla de Creta entre 1500-1700 a.C. tenía un sistema altamente desarrollado en la gestión de las aguas residuales. En la ciudad de Knossos, se han encontrado vestigios de una red de saneamiento ejecutada mediante tuberías de terracota destinadas tanto a dotar de agua a las casas como a recoger las aguas sobrantes del circuito sanitario

mediante un sistema muy similar a las técnicas usadas hoy en día. Las excavaciones han revelado cuatro alcantarillados independientes que vaciaban en grandes conductos construidos en piedra. Además disponían de una especie de letrinas con asientos de madera, que limpiaban con un chorro de agua que se descargaba desde un depósito elevado.

Esta preocupación por la salud pública fue trasladada a los romanos que, como sabemos, fueron muy avanzados en su tecnología, siendo difícilmente superados por otra civilización antes del siglo XIX.



Ilustración 6.- Tuberías de terracota.



Ilustración 7.- Letrinas Romanas.

La preocupación de los romanos por el agua se ilustra de manera inequívoca en sus obras hidráulicas, y muy particularmente en sus acueductos, que desarrollaron para proporcionar agua a sus ciudades, y así abastecer baños, fuentes, etc. Una vez abastecidas sus ciudades, tenían que resolver el problema de la recogida y canalización de las aguas residuales, para lo cual proyectaron una extensa red de alcantarillado, con desagües y sumideros en calles, fuentes y termas, que las conducían hacia el río Tíber.

En la mayoría de las vías públicas había servicios de letrinas, con asientos provistos de agujeros que daban directamente a las cloacas, y que se limpiaban periódicamente con las purgas de los depósitos de distribución.

La “Cloaca Máxima”, de 600 a.C., era la principal alcantarilla de Roma. Un colector en parte descubierto y en parte abovedado, cuya función inicial era la de drenar

las aguas del Foro y de los arroyos que a ella confluían, desde los valles situados entre las colinas, hasta río Tíber (Burks & Minnis, 1994). Posteriormente se transformó en lo que se podría denominar la primera red de saneamiento unitaria, evacuando tanto aguas pluviales como residuales.

La sección transversal de la “Cloaca Máxima” varía según el trayecto, pues ha sido construida en épocas muy diversas. En la primera zona hasta el Foro romano tiene una luz de 2,10 m., pero luego se ensancha llegando a 5 m en la zona de la desembocadura, de tal manera que se podía recorrer en barca para su inspección.

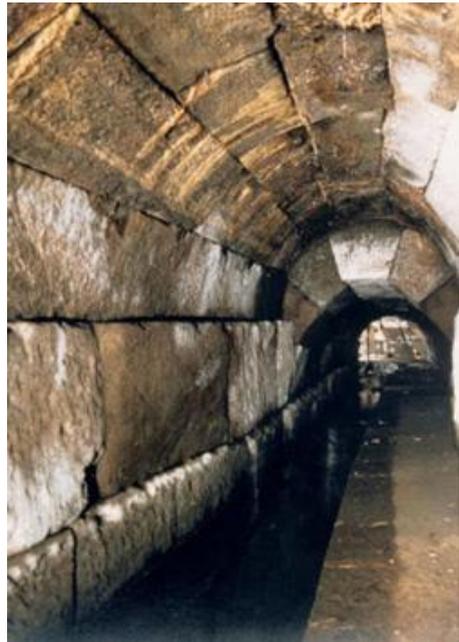


Ilustración 8.- Cloaca Maxima.

Esta red de alcantarillado estuvo en pleno funcionamiento durante siglos, entrando en decadencia por falta de mantenimiento a principios de la Edad Media. No obstante, en la actualidad alguno de los tramos puede verse en servicio 20 siglos después.



Ilustración 9.- Salida de la Cloaca Maxima (tal y como es posible verla hoy en día).

Pero incluso con todo este avance en la gestión del agua residual, Roma seguía siendo una ciudad insana. La evacuación y descarga de las aguas residuales al río Tíber todavía provocaba graves problemas de salud en la ciudad (Savas, 1977).

No obstante, tendrían que pasar muchos siglos para poder encontrar nuevos avances tecnológicos.

2.1.2. La edad media, 500 d.C. a 1500 d.C.

La caída del imperio romano en el oeste transformó una sociedad urbana en rural. La tecnología de saneamiento pasó por sus edades más oscuras. Tanto la ciudad de Roma como la mayoría de las ciudades del imperio occidental se estaban despoblando (Savas, 1977). Esta desurbanización provocó que los sistemas tradicionales de saneamiento entraran en desuso. Además, sin la supervisión de calles y alcantarillas, las condiciones higiénicas bajaron los estándares romanos, y durante prácticamente 1000 años no surgió ningún avance tecnológico significativo.

Esta pérdida de la práctica higiénica trajo numerosos problemas. La disentería, el tifo, la fiebre tifoidea y otras enfermedades, provocaron la muerte de centenares de miles de personas. La vieja práctica de separar el agua potable y los residuos fue abandonada en su mayor parte, y las aguas residuales eran evacuadas a pozos, o vertidas nuevamente a las calles.



Ilustración 10.- Sátira de la revista Punch, que demuestra la contaminación del río Támesis en 1858 con el título de "La carretera en silencio hombre (Föhl & Hamm, 1985).

Apenas hay constancias de otros servicios de saneamiento en la mayor parte de Europa hasta la Alta Edad Media.

Después de algún tiempo las ciudades comenzaron a crecer de nuevo.

El tamaño de las ciudades estaba muy limitado, por ello la densidad de población en las mismas creció considerablemente. El hacinamiento de las personas y las condiciones insalubres, generalizadas en toda Europa y Asia, provocaba que con cierta periodicidad surgieran pandemias catastróficas; como la Peste de Justiniano

(541 -542) y la Muerte Negra (1347 – 1351), que mato a decenas de millones de personas y alteró radicalmente la sociedad.

La gente todavía practicaba sus hábitos rurales, que aun siendo inofensivos en la granja, demostraron ser fatales en las ciudades crecientes de la Europa medieval. En este período los ríos de las dos ciudades europeas principales, Londres y París, eran auténticas alcantarillas descubiertas.

A pesar de lo anterior, cabe destacar algún avance significativo, introducido fundamentalmente por órdenes religiosas, como fue el novedoso criterio de reutilizar las aguas residuales como fertilizantes agrícolas.

También, hacia finales de la edad media, empezaron a construirse en Europa los denominados pozos negros; consistentes en un simple hoyo en la tierra que permitía que los sólidos sedimentaran y el líquido se filtrara a través de ella. El contenido era periódicamente retirado y empleado como fertilizante, o era vertido en los cursos de agua y tierras no explotadas (Burks & Minnis, 1994). El sistema no ofrecía buenos resultados en zonas de elevadas precipitaciones o con acuíferos superficiales; y epidemias como la peste y otras enfermedades continuaban siendo frecuentes y devastadoras.

2.1.3. El mundo moderno, años 1500 a 1900.

En la mayor parte de este período tampoco hubo avances tecnológicos significativos. Las principales novedades en el tratamiento de las aguas residuales surgieron durante el siglo XIX paralelamente a la revolución industrial.

La industrialización tuvo como consecuencia la masificación incontrolada de la población en torno a los centros de producción, creándose unas condiciones sanitarias absolutamente penosas, las cuales dieron lugar a numerosas epidemias que pusieron en evidencia la conexión entre el estado sanitario del agua de consumo y el desarrollo de enfermedades.

A pesar de que muchas ciudades disponían, desde varios siglos antes, de conductos de evacuación de aguas, estos se habían concebido, exclusivamente, para drenaje de aguas pluviales, hasta el punto de que en la Inglaterra de principios del siglo XIX estaba prohibido verter aguas residuales a esos conductos.

En 1842 Sir Edwin Chadwick elaboró un informe sobre las condiciones sanitarias en Gran Bretaña en el que se establecía la necesidad de recoger las aguas residuales en un sistema específico de alcantarillado, proponiendo la utilización de conductos de gres y la separación de las aguas residuales de las pluviales, advocating por los sistemas separativos con su célebre sentencia: “El agua pluvial al río y la residual al campo.” A partir de 1847, se estableció la obligatoriedad de conectar los edificios a las redes de alcantarillado.



Ilustración 11.- Sir Edwin Chadwick.

El primer paso para la solución del problema fue la construcción de desagües en los edificios –los cuales, hasta entonces, solamente disponían, a lo sumo, de pozos negros– y su conexión a los conductos de drenaje, dando origen a los primeros alcantarillados de tipo unitario, sistema que, posteriormente, fue adoptado por la mayor parte de las ciudades.

En definitiva, es a partir de la iniciativa británica, a mediados del siglo pasado, cuando se establecen las bases modernas del saneamiento, específicamente en lo referente al primer aspecto del mismo: la recogida y transporte de las aguas residuales.

Es interesante señalar que este primer aspecto del saneamiento constituye la práctica que durante tantos años después de su instauración ha sido entendida como principio y fin del saneamiento. Tradicionalmente, sanear una población era dotarla de una red de alcantarillado, y prácticamente no se mencionaba el tratamiento del agua residual.

Sin embargo, la construcción de las primeras redes de alcantarillado puso de manifiesto que, aunque reducían del número de puntos de vertido, mejorando,

evidentemente, las condiciones locales respecto a la situación anterior, se producía una mayor concentración de la contaminación. Inmediatamente se produjo un agravamiento del estado de los ríos, creando condiciones higiénicas y ambientales inaceptables, por lo que se sugirió la idea de que el vertido de aguas residuales no debería realizarse a aquéllos, sino que debería utilizarse para fertilizar el suelo, con lo cual se proponía el primer sistema de tratamiento y se completaba el anterior concepto de saneamiento, basado en la recogida y transporte del agua residual, con el de su depuración.

A partir de este punto, se desarrollan los primeros sistemas de depuración, inicialmente dirigidos a la eliminación de materias sólidas y posteriormente complementados con la de la materia orgánica soluble mediante los tratamientos biológicos, primero los filtros percoladores (1897) y, posteriormente, los fangos activados (1914).

A pesar de lo expuesto, no podemos dejar de mencionar dos avances tecnológicos surgidos en la segunda mitad del siglo XIX, que con ciertas modificaciones siguen siendo operativos en la actualidad:

En 1860 Jean-Baptiste Mouras inventó la fosa séptica, consistente en un depósito de chapa de cuatro metros cúbicos.

Es verdaderamente sorprendente, ver la similitud que existe entre la fosa séptica moderna, que en la actualidad se proyecta e instala en numerosas ocasiones, y la fosa séptica de Mouras modificada en la década de 1870, conocida también como tanque Foie Mouras.

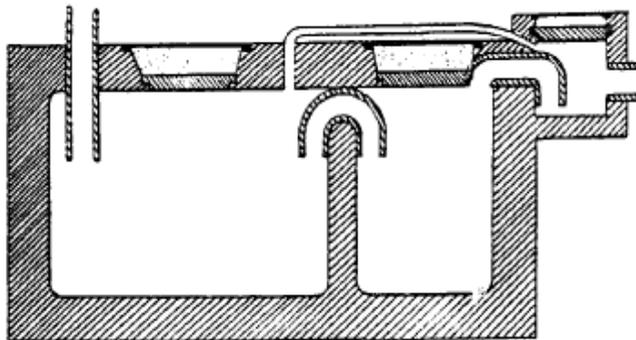


Ilustración 12.- Fosa séptica Foie Mouras.
(Fuente: www.monografias.com).

El nombre de fosa séptica se le atribuye a Donald Cameron (quien realmente patentó el invento) y que la llamó así por las condiciones y acciones sépticas que se desarrollan en el interior de la fosa.

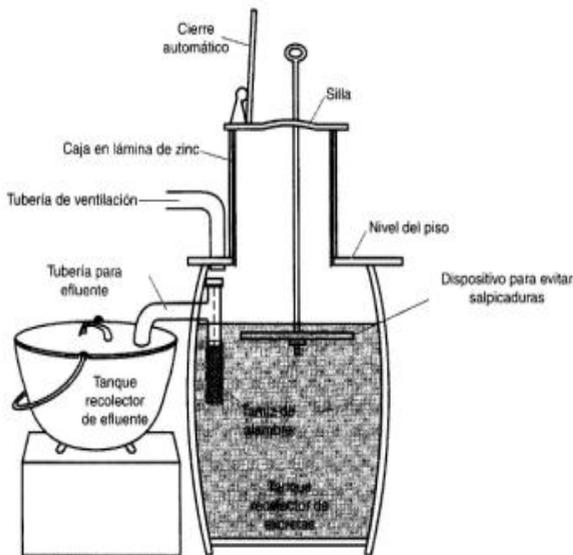


Ilustración 13.- Modificación del tanque séptico original propuesto por Mouras. (Fuente: www.monografias.com).

El propósito principal de estos tanques era eliminar los sólidos gruesos antes de su descarga al río más cercano, y éste es el gran avance con el que nos encontramos: el conocimiento de que se deben de eliminar los sólidos del agua residual antes de su vertido. Sin embargo, el invento tenía el problema de la ausencia de lecho bacteriano que descomponiera las sustancias fecales.

Esta solución, entre 1865 y 1885, se convirtió en un problema ya que convirtieron a los principales ríos de las ciudades europeas en auténticos vertederos de basura. En algunos casos y en verano, se podía ver borbotear el agua como consecuencia de la fermentación

Otro avance significativo surgió de las investigaciones realizadas en 1868 por el químico Edward Frankland, que desarrolló la tecnología de goteo del filtro de arena,

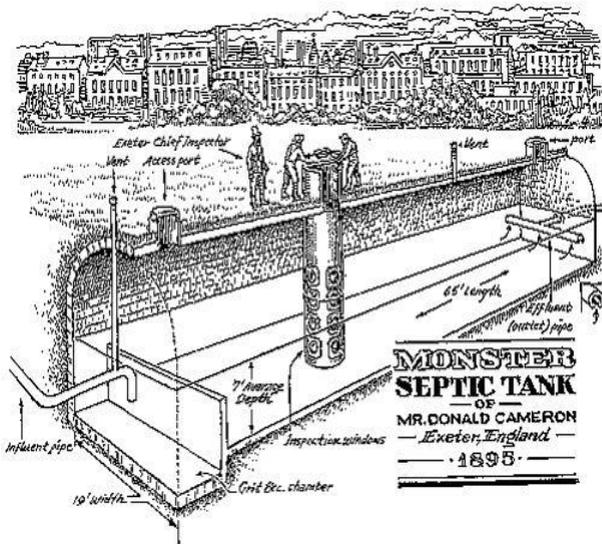


Ilustración 14.- Tanque séptico de Donald Cameron. (Fuente: www.teecsa.com).

ideando un sistema de cilindros de 10", rellenos de grava y arena, con el objeto de que las aguas residuales se filtraran a través de ellos antes de su vertido.

2.1.4. La historia reciente.

A comienzos del siglo XX, algunas ciudades empezaron a reconocer que el vertido directo de desechos en los ríos provocaba problemas sanitarios. Esto llevó a la construcción de instalaciones de depuración.

También en aquellos mismos años, particularmente en áreas rurales, se introdujo la fosa séptica como mecanismo para el tratamiento de las aguas residuales domésticas.

La tecnología que más se ha impuesto durante los últimos cien años, y que en la actualidad ocupa un lugar predominante en la depuración de aguas residuales urbanas, es la de Lodos Activos. Si bien, el origen de ésta puede situarse en 1882, no es hasta 1914 cuando alcanza su mayoría de edad, con la publicación de los trabajos llevados a cabo en Inglaterra por E. Arden y W. T. Lockett. Estos investigadores observaron que al airear las aguas residuales se producían flóculos, que por su mayor densidad se podían separar por simple decantación, comprobando, además, que si estos flóculos se mantenían en el reactor biológico se conseguía reducir de días a horas el tiempo necesario para lograr la eliminación de los contaminantes biodegradables y la nitrificación de los compuestos nitrogenados (Salas, 2004).

Sin embargo, sería injusto no valorar debidamente lo acaecido desde comienzos de siglo hasta la segunda guerra mundial, ya que la inmensa mayoría de procesos y sistemas que se utilizan en la actualidad fueron concebidos y desarrollados, hasta los límites marcados por la tecnología disponible en su momento, durante ese período. Los procesos y sistemas actuales solamente suponen, sobre aquéllos, refinamientos de índole hidráulica y tecnológica y la innovación conceptual desde entonces ha sido francamente escasa. Este hecho ya constituye de por sí un fenómeno digno de ser estudiado, habida cuenta del volumen económico que maneja el sector a nivel mundial.

No es hasta los años 50-60 cuando se desarrolla una teoría válida sobre el proceso de *Lodos Activos*, lo que permitió que se comenzasen a realizar diseños racionales basados en las propias características de las aguas residuales a tratar. A partir de

este momento, se asiste a un rápido incremento en la implantación de estaciones de tratamiento bajo la modalidad de *Lodos Activos*, que llegan a desbancar a los *Filtros Percoladores*, que desde finales del siglo XIX había sido la tecnología predominante (Salas, 2004). Desde entonces se inicia un período muy fecundo de investigación y estudio, que se continúa muy activamente en los sesenta, en que se profundiza sobre el conocimiento de los procesos biológicos, se establecen los principios básicos de su funcionamiento y los primeros modelos de los mismos, permitiendo la adopción de criterios de diseño basados en consideraciones de tipo científico más allá de los valores puramente empíricos utilizados mayoritariamente hasta la fecha (Trillo-Montsoríu, 1995).

Podemos decir que a finales de los años sesenta ya se ha desarrollado una base científica considerable en lo que se refiere a los tratamientos biológicos convencionales que, de hecho, ha perdurado hasta nuestros días, aunque, evidentemente, en los años transcurridos se han ido incorporando nuevos matices y refinamientos consecuencia de nuevos logros y descubrimientos y de la aplicación de medios de investigación y desarrollo cada vez más potentes.

En esta época se produce un salto cualitativo en la concepción del objetivo del tratamiento del agua residual, al reconocer la importancia de la eliminación de los nutrientes (Trillo-Montsoríu, 1995).

Efectivamente, hasta ese momento, ese concepto estaba centrado, exclusivamente, en la satisfacción de la demanda de oxígeno de la materia orgánica biodegradable. A pesar de que el problema de eutrofización ya había sido identificado por Naumann en 1919 y de que a mediados de los años cuarenta ya se habían efectuado numerosos estudios acerca de la incidencia de los nutrientes sobre el fenómeno, fundamentalmente en lagos, hasta esa época, la eliminación del fósforo y nitrógeno del agua residual no había sido considerada como un objetivo del tratamiento ni de la gestión de la calidad del agua. Históricamente, la adopción de estándares de emisión más restrictivos se había centrado en la DBO_5 y, complementariamente, en la transformación de los compuestos de nitrógeno y fósforo en formas inorgánicas más estables, pero no en la eliminación de estos últimos.

Sin embargo, así como la tecnología para la eliminación, por vía química, del fósforo ya era conocida, la de eliminación de los compuestos de nitrógeno no

había alcanzado un desarrollo suficiente para su aplicación efectiva y económica a escala industrial.

También a principios de los años setenta se produce un movimiento en los EEUU encaminado a la sustitución de los procesos biológicos tradicionales por otros exclusivamente físico-químicos que, en su inicio, parecía suponer un verdadero cambio cualitativo en la concepción de las plantas de tratamiento. Desafortunadamente, esta nueva concepción no tuvo éxito, en parte por la insuficiencia de la tecnología disponible en ese momento, y en parte porque los costes asociados a esos sistemas eran notablemente más elevados que los de los convencionales.

Posteriormente, desde los años ochenta hasta nuestros días, estamos asistiendo al reconocimiento oficializado de la necesidad de eliminación de los nutrientes y al consecuente desarrollo y adecuación de sistemas y procesos dirigidos a la consecución de esos objetivos (Trillo-Montsorú, 1995).

Hoy en día, la tecnología de Lodos Activos en sus distintas modalidades (Convencional, Contacto-Estabilización, Aireación Prolongada, etc.), es la más ampliamente aplicada a nivel mundial para el tratamiento de las aguas residuales urbanas (Salas, 2004) y en la actualidad más del 70% del agua tratada a nivel mundial se realiza con el sistema de lodos activados.

No obstante, en los últimos 20 años, las tecnologías no convencionales se han mostrado como una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas entidades de población. Su versatilidad y adaptabilidad, su integración en el entorno y su menor coste de implantación y explotación las hacen especialmente indicadas para la depuración de los vertidos de aguas residuales en el medio rural, en el que las limitaciones técnicas y económicas pueden comprometer seriamente la eficacia de los tratamientos convencionales de aguas residuales.

2.2. Características de las aguas residuales.

El agua que se encuentra en la naturaleza va adquiriendo, a lo largo de su ciclo hidrológico y como consecuencia de la actividad humana, diversas sustancias que definen sus características, y por tanto, sus posibles usos.

Podemos clasificar las aguas residuales de diversas maneras. En este caso se ha hecho en función de su origen (que lleva inherente una relativa clasificación de composición), según sea éste de carácter urbano o industrial.

En muchos casos las aguas residuales industriales requieren tratamiento antes de ser descargadas en el sistema de alcantarillado municipal; como las características de estas aguas residuales cambian de una a otra industria, los procesos de tratamiento son también muy variables. No obstante, muchos de los procesos empleados para tratar aguas residuales urbanas se emplean también con las industriales. Por otro lado, existen aguas residuales industriales que tienen características compatibles con las urbanas, por lo que se descargan directamente en los sistemas públicos de alcantarillado. El estudio del tratamiento específico de las aguas residuales industriales no es objeto del presente trabajo.

2.2.1. Aguas Residuales Urbanas.

Las aguas residuales urbanas son los vertidos que se generan en los núcleos de población urbana, como consecuencia de las actividades propias de estos.

Los aportes que generan estas aguas son, generalmente, los siguientes:

Aguas negras, fecales o aguas sanitarias: son las aguas mezcladas con las procedentes del metabolismo humano. Es el agua que una vez ha sido utilizada por el hombre ha quedado polucionada. Es una combinación de las aguas procedentes de los retretes de las viviendas, de los centros comerciales, etc.

Aguas de lavado doméstico, son las llamadas aguas grises, que según el Diccionario Técnico del Agua son “las procedentes de los usos domésticos antes de mezclarse con las aguas fecales. Proceden del lavado de ropa, limpieza de la casa, desperdicios de comida, etc.” Contienen materia en suspensión formada por tierra, arena y diversas materias insolubles, materia orgánica, grasas, detergentes y sales diversas.

Aguas de drenaje de calles. Estas aguas presentan, en general, un volumen muy pequeño, y su contaminación depende de las condiciones locales.

Agua de lluvia y lixiviados. Es el agua que cae de las nubes en forma líquida o sólida. Es un agua que nunca es pura. Contiene disueltos distintos gases, además de determinados iones que se encuentran en la atmósfera en forma de polvo y que son resultado o consecuencia de diversos fenómenos que en ella se producen. Esto es, particularmente notable, en las zonas industriales y en las grandes aglomeraciones urbanas, en la que la atmósfera que los rodea está extraordinariamente polucionada.

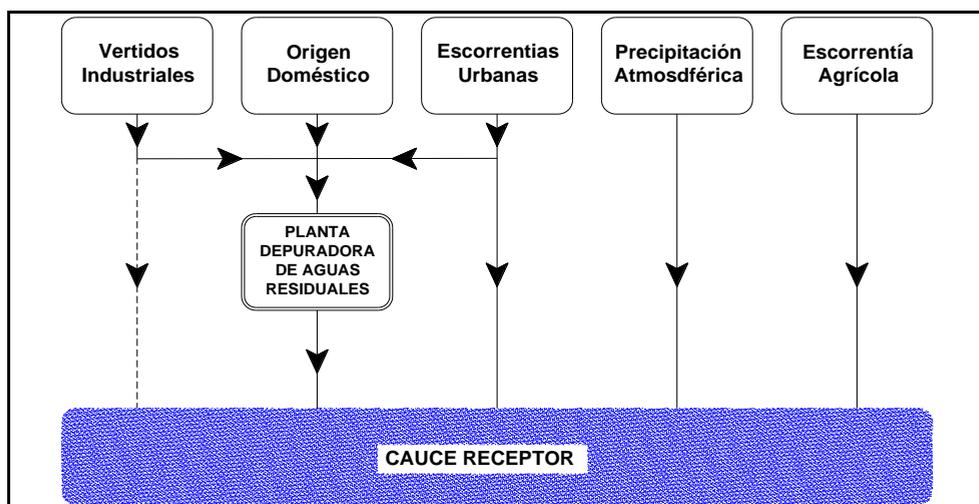


Ilustración 15.- Fuentes de Contaminación. (Fuente: Hernández Muñoz, 2001).

Las aguas residuales urbanas presentan cierta homogeneidad en cuanto a composición y carga contaminante, ya que sus aportes van a ser siempre los mismos, es decir, su composición varía muy poco de unas poblaciones a otras, tanto cuantitativa como cualitativamente.

Pero esta homogeneidad tiene unos márgenes amplios, ya que las características de cada vertido urbano van a depender del núcleo de población en que se genere, influyendo parámetros tales como el número de habitantes, la existencia de industrias dentro del núcleo, tipo de industria, etc.

A continuación se presenta una tabla que recoge la composición típica de un agua residual urbana no tratada.

Parámetro	Concentración (mg/l)		
	baja	media	alta
Sólidos totales	350	700	1200
Sólidos disueltos	250	500	850
Fijos	145	300	525
Volátiles	105	200	325
Sólidos en suspensión	100	200	350
Fijos	30	50	75
Volátiles	70	150	275
Sólidos sedimentables	5	10	20
Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	100	200	300
Demanda bioquímica de Oxígeno (DQO)	250	500	1000
Nitrógeno total (como N)	20	40	85
Orgánico	8	15	35
Amoníaco libre	12	25	50
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo total (como P)	6	10	20
Orgánico	2	3	5
Inorgánico	4	7	15
Cloruros	30	50	100
Sulfatos	20	30	50
Alcalinidad (como CaCO ₃)	50	100	200
Aceites y grasas	50	100	150

Tabla 1: Composición típica de las aguas residuales urbanas (Metcalf & Eddy, 1995).

2.2.2. Aguas Residuales Industriales.

Son aquellas que proceden de cualquier actividad o negocio en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice agua.

Presentan características muy distintas de las aguas residuales urbanas. Son enormemente variables en cuanto a caudal y composición, difiriendo las características de los vertidos, no sólo de una industria a otra, sino también dentro de un mismo tipo de industria.



Ilustración 16.- Vertido industrial.

A veces, las industrias no emiten vertidos de forma continua, sino únicamente en determinadas horas del día o incluso únicamente en determinadas épocas del

año, dependiendo del tipo de producción y del proceso industrial. También son habituales las variaciones de caudal y carga a lo largo del día.

Están más contaminadas que las aguas residuales urbanas, además, con una contaminación mucho más difícil de eliminar. Su alta carga unida a la enorme variabilidad que presentan, hace que el tratamiento de las aguas residuales sea complicado. Por esta razón, al querer adentrarse en el amplio mundo del conocimiento de las aguas residuales industriales, se corre el peligro de equivocarse al querer simplificar el problema, intentando generalizar e incluso querer extrapolar, aplicando las técnicas que se aplican en las aguas residuales urbanas. Por esta razón es necesario un estudio específico en cada caso.

La complejidad de las aguas residuales industriales hace que sea difícil, por no decir imposible, encerrarlas dentro de una clasificación, por muy complicada que sea, y que existen prácticamente tantas aguas residuales industriales como industrias. Por esto, han sido muchas las clasificaciones que se han propuestos para éstas, ninguna totalmente aceptada.

A diferencia de las aguas residuales domésticas, los efluentes industriales contienen con frecuencia sustancias que no se eliminan por un tratamiento convencional, bien por estar en concentraciones elevadas, o bien por su

naturaleza química. Muchos de los compuestos orgánicos e inorgánicos que se han identificado en aguas residuales industriales son objeto de regulación especial debido a su toxicidad o a sus efectos biológicos a largo plazo.

Por lo expuesto, tal y como se ha comentado con anterioridad, el estudio del tratamiento específico de las aguas residuales industriales no es objeto del presente trabajo.

2.2.3. Aguas Mixtas.

La calidad y cantidad de las aguas residuales generadas por una población está muy influenciada por la incorporación a las mismas, periódica o accidentalmente, de vertidos industriales.

En relación con la calidad, las variaciones de carga de las aguas residuales industriales, ya sea cualitativa o cuantitativamente, perturban el funcionamiento de las depuradoras y suele producirse cuando las industrias existentes varían su programa de fabricación. Una sobrecarga en materias orgánicas provoca una demanda mayor de oxígeno, generándose lodos voluminosos de escasa densidad que sedimentan difícilmente.

Las variaciones cualitativas de la carga orgánica, caracterizadas por cambios en la estructura química de las materias orgánicas contenidas en los efluentes, obligan a los microorganismos a desarrollar nuevos sistemas enzimáticos, lo que exige un periodo más o menos largo de maduración y adaptación a las condiciones ecológicas del medio: pH, temperatura, presión osmótica y elementos tóxicos.

Cuando aumenta, durante un tiempo notable, el caudal de un vertido disminuye el tiempo de permanencia de las aguas residuales en la depuradora, reduciéndose la eficiencia de la misma.

No obstante, el tratamiento en común de las aguas residuales urbanas e industriales constituye la solución más eficaz del problema de depuración de efluentes. Por esto, en el estudio de la depuración de las aguas residuales es muy importante conocer la acción tóxica de determinadas sustancias, ya que éstas puede ralentizar e incluso anular, la acción de los microorganismos que actúan en la depuración de las aguas.

A pesar de los posibles inconvenientes que se pueden presentar en las aguas mixtas como consecuencia de determinados contaminantes, siempre que sea posible es aconsejable que la industria trate sus aguas residuales mezcladas con las urbanas, y en caso de ser necesario, que ésta realice un tratamiento previo al vertido, con el objeto de eliminar compuestos no deseados. De esta manera se tendrán las siguientes ventajas:

- División de los costos de depuración. El mayor tamaño de la planta depuradora disminuye el costo de operación por unidad de carga contaminante.
- Las aguas residuales urbanas aportan nutrientes, como nitrógeno y fósforo, a las aguas residuales industriales que sean deficitarias de esos elementos.
- Garantizar una depuración más uniforme de las aguas residuales.

Ahora bien, el aporte de las aguas residuales industriales también trae algunos perjuicios, por lo que deben controlarse, entre otros, los siguientes aspectos:

- La homogeneidad de las aguas residuales (temperatura inferior a 60 °C, sólidos en suspensión inferior a 350 mg/l)
- La uniformidad del caudal (establecer límites del volumen de admisión de las aguas residuales industriales)
- El pH (debe estar comprendido entre 5,5 y 9,0)
- Que no existan inhibidores ni compuestos tóxicos
- Que el contenido en aceites y grasas no sea excesivo (concentración de grasas inferior a 100 mg/l)

2.3. Fundamentos básicos del tratamiento de aguas residuales urbanas.

En general, las instalaciones que se precisan para el tratamiento de las aguas residuales urbanas constan de tres elementos principales (Centa, 2006):

- Recogida y conducción de las aguas generadas hasta la estación de tratamiento.
- Tratamiento de las aguas residuales.
- Evacuación de los productos resultantes del tratamiento, efluentes depurados y lodos.

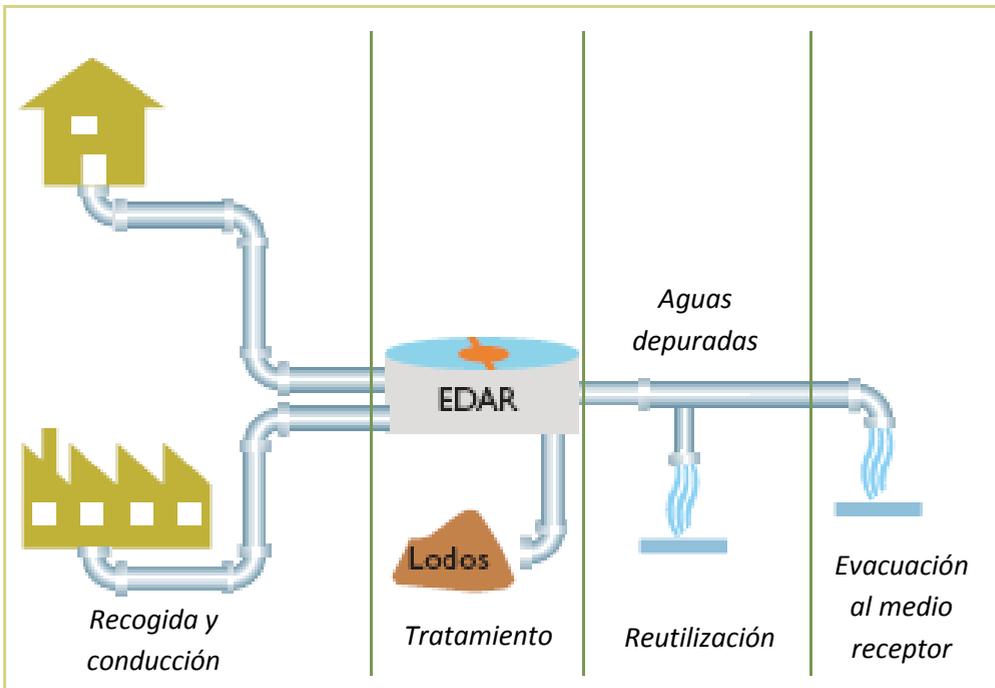


Ilustración 17.- Elementos constituyentes de las instalaciones para el tratamiento de las aguas residuales urbanas (Centa, 2006).

2.3.1. Recogida y conducción.

La recogida y conducción de las aguas residuales urbanas desde la población en la que se generan hasta la estación depuradora se realiza a través de una compleja red de tuberías que, dependiendo de la topografía del terreno, son conducidas por gravedad a la planta de tratamiento, o mediante estaciones de bombeo.

Estos sistemas pueden ser unitarios, en los que la red recoge tanto las aguas residuales como las pluviales, o separativos, donde los colectores que llegan a la estación de tratamiento transportan tan sólo aguas residuales, mientras que las aguas pluviales se recogen en colectores independientes.

En ocasiones, con el objeto de evitar excesos de caudal a la entrada de la estación depuradora, se llevan a cabo una serie de actuaciones para prevenir la posterior contaminación de los medios receptores. Estas actuaciones pueden ser:

- Implantación de aliviaderos con una relación de dilución más elevada.
- Instalación de equipos de desbaste en el vertido de los aliviaderos, al objeto de separar y retirar los elementos gruesos.
- Construcción de balsas o depósitos de tormentas para regular la incorporación de caudales excepcionales a las instalaciones de Tratamiento.

Así mismo, para derivar todo el agua residual antes de su entrada a la depuradora, en caso de problemas de funcionamiento, se instala a la llegada de los vertidos un by-pass general. Además de éste, se disponen by-pass parciales detrás de cada etapa del tratamiento de las aguas para que en caso de que se registren incidentes operativos, poder proceder al vertido de los efluentes de estas etapas sin pasar por la fase siguiente. Estos by-pass suelen descargar en una misma línea, junto con el by-pass general y los efluentes depurados.

2.3.2. Tratamiento - La línea de agua.

De forma general, las distintas etapas en las que tienen lugar el tratamiento de las aguas residuales urbanas en una depuradora convencional son: Pretratamiento, Tratamientos Primario, Secundario y Terciario.

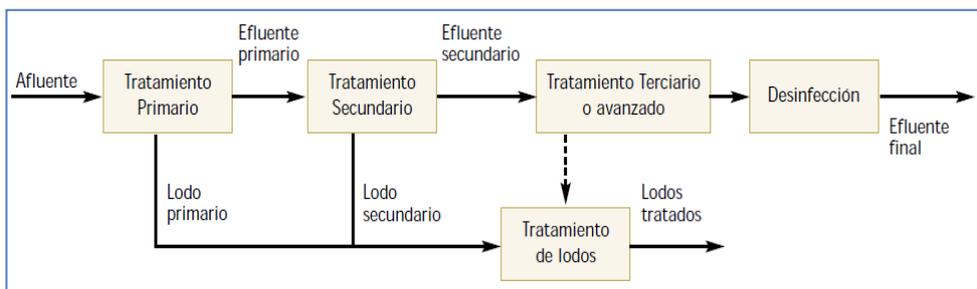


Ilustración 18.- Configuración típica de una planta convencional de tratamiento de aguas residuales.

Pretratamiento

Las aguas residuales antes de su tratamiento, propiamente dicho, se someten a un Pretratamiento, que comprende una serie de operaciones físicas y mecánicas, que tienen por objetivo separar del agua residual la mayor cantidad posible de materias, que, por su naturaleza o tamaño, pueden dar lugar a problemas en las etapas posteriores del tratamiento. El correcto diseño y posterior mantenimiento de la etapa de pretratamiento son aspectos de gran importancia, pues cualquier deficiencia en los mismos repercute negativamente en el resto de las instalaciones, originando obstrucciones de tuberías, válvulas y bombas, desgaste de equipos, formación de costras, etc.

Las operaciones que comprende el pretratamiento generalmente son: separación de grandes sólidos, desbaste, tamizado, desarenado, y desengrasado.

Separación de grandes sólidos: Cuando en las aguas residuales a tratar se prevea la presencia de sólidos de gran tamaño, o una excesiva cantidad de arenas, se recurre a ubicar en cabecera de la instalación de depuración un pozo de gruesos, que permita la separación de estos elementos.

El pozo de gruesos se sitúa a la entrada del colector a la EDAR, presentando su parte inferior forma troncopiramidal invertida, de paredes muy inclinadas, al objeto de concentrar los sólidos a eliminar en una zona específica, desde la que sea fácil su extracción.

La retirada de los sólidos depositados se efectúa mediante una cuchara anfibia, con movimientos de desplazamiento vertical y horizontal mediante polipasto y grúa pórtico.

Los residuos extraídos por la cuchara se depositan en contenedores, como paso previo a su envío a vertedero.



Ilustración 19.- Pozo de gruesos.



Ilustración 20.- Reja de desbaste automática.

Desbaste: consiste en la eliminación de los sólidos de tamaño grande y mediano (trozos de madera, trapos, raíces, etc.), así como de finos, que de otro modo podrían deteriorar o bloquear los equipos mecánicos y obstruir el paso de la corriente de agua. El procedimiento más usual consiste en hacer pasar las aguas a través de rejillas, que de acuerdo con la separación entre los barrotes pueden clasificarse en:

Desbaste de gruesos: el paso libre entre los barrotes es de 50 a 100 mm.

Desbaste de finos: el paso libre entre los barrotes es de 10 a 25 mm.

Tamizado: tiene por objeto la reducción del contenido de sólidos en suspensión de las aguas residuales, mediante su filtración a través de un soporte delgado dotado de ranuras de paso. Para el pretratamiento de las aguas residuales urbanas se recurre al empleo de tamices con luces de paso comprendidas entre 0,2 y 6 mm.

Existen dos tipos de tamices:

Estáticos. Constan de un enrejado inclinado constituido por barras horizontales, orientados de tal forma que la parte plana se encara al flujo. El agua a tratar se introduce por la parte superior del tamiz, y los sólidos mayores que la luz de paso quedan retenidos por el enrejado, rodando hasta un contenedor.

Rotativos. Están constituidos por un enrejado cilíndrico de eje horizontal, que gira lentamente accionado por un motorreductor. La alimentación del tamiz se efectúa por su parte exterior, y los sólidos de tamaño superior a la luz de paso, quedan retenidos en la parte externa del cilindro, eliminándose por la acción de una cuchilla y por el propio giro de la unidad.



Ilustración 21.- Rototamiz.

Desarenado: su objetivo es la extracción de la mayor cantidad posible de las arenas presentes en las aguas residuales. Dentro de la denominación “arenas” se incluyen las arenas propiamente dichas, gravas y partículas más o menos grandes de origen mineral u orgánico. Con esta operación se pretende proteger los equipos mecánicos contra la abrasión y el desgaste y evitar la acumulación de estas materias pesadas. Normalmente, se dimensionan los desarenadores para la eliminación de partículas de tamaño superior a los 0,2 mm.

Desengrasado: en esta etapa se eliminan las grasas y demás materias flotantes de menor densidad que el agua.

Normalmente, las operaciones de desarenado y desengrasado se llevan a cabo de forma conjunta en unidades de tratamiento conocidas como desarenadores-desengrasadores aireados.



Ilustración 22.- Desarenador-desengrasador aireado.

Tratamientos Primarios

El Real Decreto Ley 11/95 define Tratamiento Primario como “el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso físico o fisicoquímico que incluya la sedimentación de sólidos en suspensión, u otros procesos en los que la DBO₅ de las aguas residuales que entren, se reduzca, por lo menos, en un 20% antes del vertido, y el total de sólidos en suspensión en las aguas residuales de entrada se reduzca, por lo menos, en un 50%”.

Los Tratamientos Primarios más habituales son:

Decantación primaria: cuyo objetivo es la eliminación de la mayor parte de los sólidos sedimentables, bajo la acción exclusiva de la gravedad. La retirada de estos sólidos es muy importante, ya que en caso contrario originarían fuertes demandas de oxígeno en el resto de las etapas de tratamiento de la estación.



Ilustración 23.- Decantador Primario.

Tratamientos fisicoquímicos: en este tipo de tratamiento se consigue, mediante la adición de reactivos químicos, incrementar la reducción de los sólidos en suspensión, al eliminar, además, sólidos coloidales. Se incrementa el tamaño y densidad de los mismos mediante procesos de coagulación-floculación. Estos tratamientos se aplican fundamentalmente:

- Cuando las aguas residuales presentan vertidos industriales que pueden afectar negativamente al tratamiento biológico.
- Para evitar sobrecargas en el posterior tratamiento biológico.
- Cuando se dan fuertes variaciones estacionales de caudal.
- Para la reducción del contenido en fósforo.

Tratamientos secundarios

El Real Decreto Ley 11/95 define Tratamiento Secundario como “el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso que incluya un tratamiento biológico con sedimentación secundaria u otro proceso, en el que se respeten los requisitos que se establecerán reglamentariamente”.

Con estos tratamientos se pretende la reducción de la contaminación orgánica y la coagulación y eliminación de sólidos coloidales no decantables. Los procesos biológicos se realizan con la ayuda de

microorganismos (fundamentalmente bacterias), que en condiciones aerobias actúan sobre la materia orgánica presente en las aguas residuales. El aporte de oxígeno para el mantenimiento de las reacciones biológicas (oxidación, síntesis y respiración endógena), generalmente se realiza introduciendo aire en los recipientes donde se llevan a cabo estas reacciones.



Ilustración 24.-Parrilla de difusores en reactor biológico.

Estos recipientes se conocen con el nombre de Reactores Biológicos o Cubas de Aireación. Los métodos más habituales para el aporte de oxígeno a los Reactores Biológicos hacen uso de aireadores mecánicos o de difusores.

Las nuevas bacterias que van apareciendo en los reactores tienden a unirse (floculación), formando agregados de mayor densidad que el líquido circundante, y en cuya superficie se va adsorbiendo la materia en forma coloidal. Para la separación de estos agregados, conocidos como lodos o fangos, el contenido de los Reactores Biológicos (licor de mezcla) se conduce a una etapa posterior de decantación (Decantación o Clarificación

Secundaria), donde se consigue la separación de los lodos de los efluentes depurados por la acción de la gravedad.

De los lodos decantados una fracción se purga como lodos en exceso, mientras que otra porción se recircula al Reactor Biológico para mantener en él una concentración determinada de microorganismos. El proceso anteriormente descrito, se conoce como Lodos Activos (o Activados).

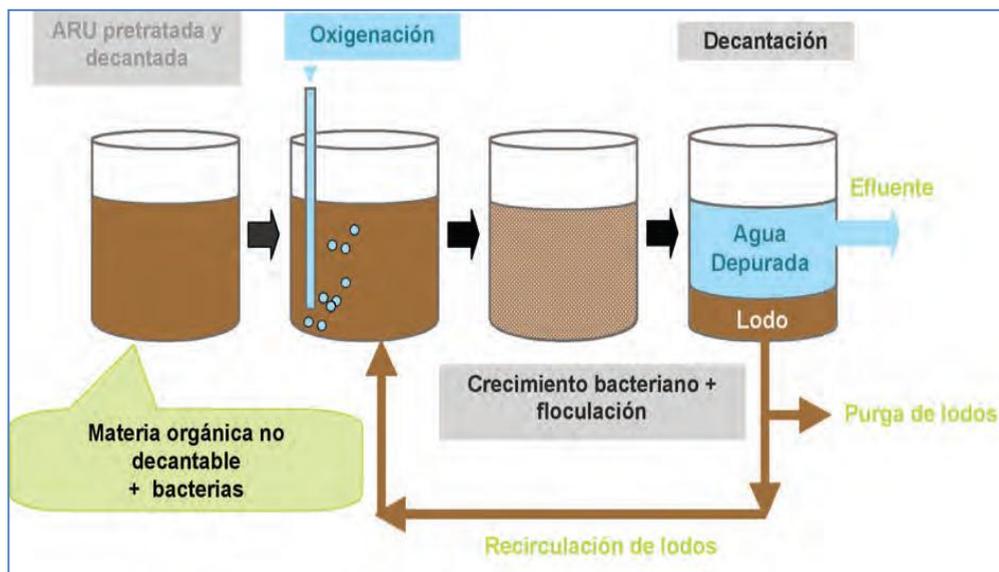


Ilustración 25.- Esquema de Tratamiento Secundario en la depuración de las aguas residuales urbanas.

Para la eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo), se recurre cada vez más al empleo de procesos biológicos. No obstante, en el caso del fósforo, los procesos de precipitación química, empleando sales de hierro y de aluminio, continúan siendo los de mayor aplicación.

En la eliminación biológica del nitrógeno se opera de forma secuencial bajo condiciones óxicas y anóxicas, que dan como resultado final su liberación a la atmósfera, en forma de nitrógeno gaseoso.

Para la eliminación biológica del fósforo, se combinan reactores operando bajo condiciones anaerobias, óxicas y anóxicas, quedando el fósforo almacenado en los microorganismos, que posteriormente se extraen como lodos en exceso. Combinando los procesos anteriores también es posible la eliminación conjunta de ambos nutrientes.

Tratamientos terciarios

Los Tratamientos Terciarios, también conocidos como tratamientos avanzados, permiten obtener mejores rendimientos de eliminación de DBO_5 y materia en suspensión, así como reducir otros contaminantes como nutrientes y metales, lo que puede permitir la posterior reutilización de los efluentes depurados. El tratamiento terciario es un proceso de depuración complementario al secundario formado, en general, por una coagulación-floculación, una decantación y/o una filtración y una desinfección. Puede llegar a eliminar una fracción elevada de los virus y las bacterias presentes en el efluente. Además, este proceso de tratamiento reduce la turbiedad del agua residual hasta niveles muy bajos, lo que asegura la eficacia del proceso de desinfección que se efectúa posteriormente (Pérez-Morales, et al., 2014).

La eliminación de materia particulada y coloidal presente en los efluentes depurados puede lograrse mediante la aplicación de tratamientos fisicoquímicos (coagulación-floculación) y la posterior etapa de separación (filtración, decantación).



Ilustración 26.- Canal de Cloración.

Con relación a la desinfección de los efluentes depurados. El cloro ha sido, y continua siendo, el desinfectante típico en el campo de las aguas residuales. Al incrementarse el número de requisitos para lograr bajas o indetectables cantidades de cloro residual en los efluentes tratados, se hace precisa la implantación de

procesos posteriores de dechloración, o bien, la sustitución de los sistemas de cloración por sistemas de desinfección alternativos, tales como la radiación UV, el empleo de ozono, el uso de membranas de filtración o los sistemas naturales entre los que destacan las lagunas de maduración y los humedales artificiales, como veremos posteriormente.

2.3.3. Tratamiento - Línea de lodos.

El tratamiento de las aguas residuales urbanas conduce a la producción de unos subproductos conocidos como lodos o fangos, o más recientemente, biosólidos, entre los que cabe hacer la distinción de:

- Lodos primarios: son los sólidos decantados en el Tratamiento Primario.
- Lodos secundarios o biológicos: corresponden a los sólidos retenidos en el Decantador tras el paso de las aguas por el Reactor Biológico.

En el tratamiento de los lodos generados en la depuración de las aguas residuales urbanas existen una serie de etapas, consistentes en:

Espeamiento: se incrementa la concentración del lodo mediante la eliminación del agua que contiene. Los métodos más habituales son por gravedad y por flotación.



Ilustración 27.- Espesador de fangos por flotación.

Estabilización: se reduce la fracción biodegradable presente en los lodos, para evitar su putrefacción y la consecuente generación de olores desagradables. La estabilización puede hacerse mediante:



Ilustración 28.- Digestor Anaerobio para estabilización de fangos.

- Digestión aerobia o anaerobia, eliminándose en torno al 40-50% de la materia orgánica presente en el lodo.
- Estabilización química, mediante la elevación del pH por adición de cal.
- Tratamiento térmico.

Acondicionamiento: mediante la adición de productos químicos, se mejora la deshidratación de los lodos, facilitando la eliminación del agua.

Los reactivos que se emplean pueden ser de origen mineral u orgánico. Normalmente, los reactivos minerales se adaptan mejor a una deshidratación por filtros de vacío y filtros prensa, y los reactivos orgánicos a la centrifuga y filtro banda.



Ilustración 29.- Equipo de acondicionamiento químico de lodos.

Deshidratación: se elimina parte del agua contenida en los lodos, con el objeto de transformarlos en sólidos fácilmente manejables y transportables. Los métodos más habituales son:

- Centrifugación.
- Filtración (bandas, vacío, presión, etc.).
- Secado térmico.
- Eras de secado.



Ilustración 30.- Decantadora Centrifuga.

2.3.4. Evacuación.

Como se ha comentado, en una estación depuradora la corriente entrante (aguas residuales urbanas), como consecuencia de los procesos de tratamiento a que se ve sometida, se transforma en dos corrientes salientes: efluentes depurados y lodos. Con la evacuación de ambas corrientes se da por finalizado el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Los efluentes depurados, si han alcanzado el grado de tratamiento requerido en cada caso, pueden ser vertidos a los medios receptores próximos a la estación depuradora, aunque, cada vez más, existen otros

destinos alternativos para su reutilización, tal y como se expone en el siguiente apartado.

En el caso de los lodos, como alternativas a su descarga en vertedero deben contemplarse los siguientes destinos:

- Uso agrícola: los lodos contienen entre un 40 y un 80% de materia orgánica, así como nitrógeno y fósforo, nutrientes fundamentales para el crecimiento vegetal.
- Incineración: de esta manera se reduce al máximo el volumen del fango, se destruyen los patógenos y compuestos tóxicos y es posible la recuperación de energía. Por el contrario, los costes son elevados, y las emisiones gaseosas y cenizas producen efectos negativos sobre el medio ambiente.

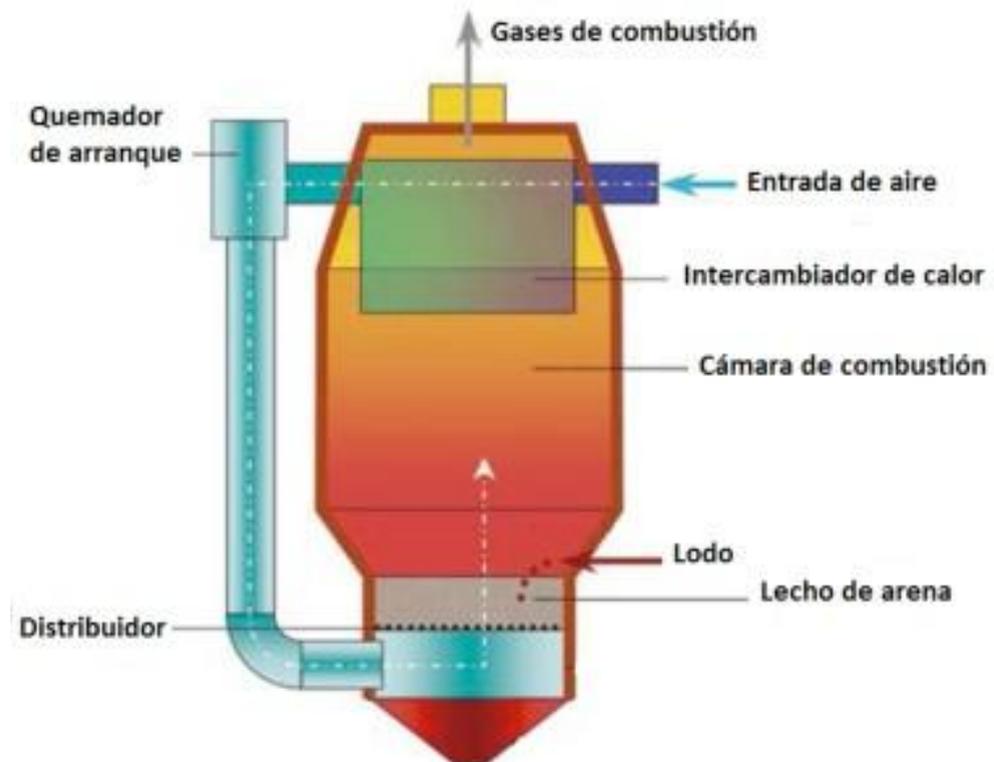


Ilustración 31.- Esquema típico del horno donde se lleva a cabo la incineración

2.4. Tratamientos avanzados para la reutilización de aguas residuales.

2.4.1. Usos y destinos de las aguas residuales tratadas

La escasez de agua dulce, es un preocupante problema en claro aumento en muchas regiones de nuestro planeta. El crecimiento demográfico, el progresivo deterioro de las aguas superficiales y subterráneas, la desigual distribución de los recursos hídricos y las sequías han dado lugar que se plantee como clara alternativa el uso de aguas residuales tratadas en diferentes destinos.

Hoy en día, la reutilización de aguas residuales urbanas es ya un fenómeno de práctica habitual en la mayoría de los países desarrollados, más allá de cuál sea el tamaño de sus recursos hídricos naturales. De hecho, en la actualidad, en dichos países desarrollados, el 70 % de las aguas residuales es tratada mientras que en los países con ingresos medios el tratamiento se sitúa entre el 38 y el 28 % y en los países más pobres llega tan sólo al 8 % (Sato, et al., 2013).

Los usos que se dan a las aguas residuales ya transformadas para un proceso de reutilización son muy diversos, aunque predominan todo tipo de riegos y el aprovechamiento en recargas artificiales. De forma genérica, estos que siguen serían los grandes conjuntos de actividades en que es más común la reutilización de aguas residuales:

- Reutilización en el medio urbano.
- Reutilización industrial.
- Reutilización agrícola.
- Usos recreativos y medioambientales. Conservación y gestión de espacios naturales.
- Recarga de acuíferos.
- Adaptación a recursos de aguas potables.

2.4.1.1. Reutilización en el medio urbano

El uso, en el medio urbano de aguas residuales tratadas cada vez es más notorio (Lazarova, et al., 2012). Las ciudades ya comienzan a tener en

cuenta en su planificación del sistema de abastecimiento de aguas el origen del recurso: aguas potables y/o aguas regeneradas.

Para incorporar el uso de aguas residuales tratadas en dicha planificación, se debe fijar si el suministro de agua regenerada ha de ser continuo o discontinuo. En general es aceptable un sistema discontinuo, a menos que el agua regenerada sea la única fuente de suministro.

La demanda diaria de agua regenerada de un determinado sistema urbano se puede estimar como suma de los consumos diarios en sus diversos campos de aplicación. La estimación de cada uno de ellos sigue los mismos criterios que si el suministro se hace con agua potable.

La red de distribución de agua regenerada debe garantizar la seguridad del servicio y la protección de la salud de los ciudadanos. Por ello, el diseño de todo sistema de distribución debe responder a los siguientes requerimientos:

- Asegurar que el agua servida tiene la calidad requerida por el consumidor.
- Evitar posibles conexiones accidentales con la red de agua potable.
- Evitar cualquier uso incorrecto del agua regenerada (no potable).

El diseño y dimensionamiento de la red de distribución son similares a los de la red de agua potable, pudiéndose emplear incluso los mismos materiales de construcción. No obstante, es importante diferenciar claramente ambas redes para evitar interconexiones.

Entre las aplicaciones más habituales de las aguas residuales depuradas, en el medio urbano se pueden citar:

- Riego de zonas públicas: parques y jardines, campos deportivos, medianas, cementerios, áreas verdes de edificios públicos, cinturones verdes, etc.
- Riego y limpieza de urbanizaciones o áreas residenciales.



Ilustración 32.- Riego de zonas públicas

- Riego y limpieza de zonas comerciales, polígonos industriales, etc.
- Riego de campos de golf.
- Usos comerciales: lavado de automóviles, limpieza de ventanas y cristalerías de grandes edificios.
- Usos ornamentales y decorativos: fuentes y estanques.
- Red de agua para uso contra incendios.
- Agua de cisternas para urinarios públicos y en edificios comerciales e industriales.



Ilustración 33.- Protección Contra incendios

La reutilización de agua en la ciudad exige habitualmente una calidad superior que en otras aplicaciones, por lo que suele ser necesaria la incorporación de tratamientos específicos como filtración y desinfección, así como algunos ajustes finales de la calidad.

2.4.1.2. Reutilización industrial

La reutilización en usos industriales representa un importante mercado potencial para el agua regenerada. Las industrias cuyos procesos no requieran aguas de alta calidad, y aquellas otras que se encuentren localizadas cerca de poblaciones con capacidad de generación suficiente de agua residual, son las candidatas ideales para incorporar la reutilización en sus procesos industriales.

El agua tratada destinada a este tipo de usos puede proceder, bien de aguas industriales recicladas en la propia instalación, o bien de plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas. El aprovechamiento de los efluentes urbanos en la reutilización industrial todavía no es una práctica muy desarrollada.

Las aplicaciones industriales más frecuentes para las aguas reutilizadas son:

- Sistemas de refrigeración
- Aguas de alimentación de calderas

- Aguas de proceso

siendo el primer grupo el más habitual.

Los sistemas de refrigeración se clasifican de forma general en sistemas abiertos y cerrados. En los primeros, el agua se pone en contacto una sola vez con el equipo a refrigerar y después es descargada caliente. Este método requiere grandes volúmenes de fluido y por ello raramente puede considerarse el agua

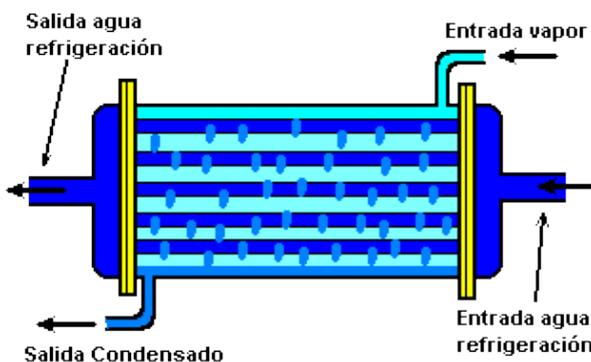


Ilustración 34.- Sistema tipo de refrigeración.

depurada como alternativa viable en el suministro. En los sistemas cerrados, el agua absorbe el calor del proceso y luego lo transfiere por evaporación, siendo posteriormente recirculada al sistema de refrigeración, completándose el ciclo. Este sistema puede emplear torres o balsas de refrigeración para llevar a cabo la evacuación del calor. La reposición de las pérdidas por evaporación suele ser muy variable.

Las exigencias de calidad para aguas de refrigeración están relacionadas con la prevención de los siguientes fenómenos:

- formación de costras
- crecimiento biológico
- obstrucciones
- formación de espumas
- corrosión

El tratamiento adicional que requiere el agua residual tratada con el objeto de ser reutilizada en la alimentación de calderas, difiere poco del que debe afrontar el suministro convencional de agua para estos sistemas.

El considerable nivel de tratamiento y las cantidades relativamente pequeñas de agua que se manejan, convierten la reutilización en

alimentación de calderas en una pobre alternativa, poco utilizada por el momento.

La idoneidad del uso de agua regenerada dentro de los procesos industriales depende de las necesidades específicas de calidad de cada proceso. Hasta la fecha existe poca experiencia en este campo, estando siempre el reciclado orientado a la recirculación dentro de la misma industria.

Además de los expuestos también se puede encontrar el uso de aguas residuales tratadas en otras actividades industriales como en los procesos de construcción, el transporte y lavado de materias primas: carbón, azucareras; productos acabados y semiacabados: pastas en papeleras, productos de laminado, pieles en curtidurías, tejidos en tintorerías; lavados de mantenimiento: vagones, suelos, calles de polígonos industriales, fachadas, producción de microalgas, piscicultura, etc.



Ilustración 35.- Industria papelera.

2.4.1.3. Reutilización agrícola

El volumen de agua que es empleado a nivel mundial en la actualidad en agricultura es diez veces mayor que la demanda existente en cualquier otro uso. Este hecho, unido al evidente ahorro de recurso que proporciona la reutilización agrícola, y la oportunidad de integrarla con otros tipos de aprovechamientos, hace que la mayoría de los proyectos de reutilización la contemplen.

Al margen del menor coste en el proceso de depuración, la reutilización de aguas residuales para el riego presenta múltiples



Ilustración 36.- Riego agrícola.

ventajas. En primer lugar el agua tratada representa una fuente constante y segura de agua aún en los años más secos. También es un aporte continuo de nutrientes para las plantas que a su vez representa un ahorro en gastos de fertilización. Y finalmente con su uso se contribuye a la conservación de los recursos hídricos y a la reducción del coste económico del agua destinada a riego ya que aguas de otra procedencia pueden resultar a mayor precio.

Tres son los aspectos fundamentales que deben tenerse en cuenta en los programas de reutilización en agricultura (como para cualquier tipo de agua):

- Necesidades de riego.
- Nivel de calidad requerido.
- Consideraciones acerca del diseño del sistema.

Las necesidades de riego de los cultivos varían de forma mensual en función de las precipitaciones, la temperatura, el tipo de cultivo, el estado de crecimiento de las plantas y el método de riego empleado.

Los constituyentes del agua residual que tienen mayor importancia en el riego agrícola son la salinidad, el sodio, el exceso de cloro residual y algunos componentes minoritarios, según el cultivo de que se trate. En el agua regenerada los contenidos de estos constituyentes son generalmente mayores que en las aguas blancas habitualmente empleadas en riegos.

Las causas más frecuentes que influyen desfavorablemente en la calidad original del agua residual, con vistas a su aprovechamiento agrícola son:

- Descargas industriales de componentes potencialmente tóxicos dentro del sistema de alcantarillado urbano.
- Infiltración de agua salada en el sistema de alcantarillado de las zonas costeras.
- Elevada mineralización del agua de primera utilización.

El riego con agua residual tratada requiere el cuidado de otros aspectos aparte de los citados anteriormente. La habilidad del sistema en cuanto al suministro de los caudales adecuados, así como de unas calidades establecidas, son los aspectos más importantes a tener en cuenta.

El sistema de monitorización es otro aspecto fundamental. En la mayoría de los casos, el suministrador debe controlar la calidad de sus aguas a intervalos específicos, a través de determinados parámetros, tanto en la planta de tratamiento, como en el sistema de distribución.

Se debe indicar que en numerosas ocasiones los agricultores utilizan aguas residuales no solo por la carestía de agua dulce para sus cultivos sino también por ser una fuente barata de nutrientes.

2.4.1.4. Usos recreativos y medioambientales. Conservación y gestión de espacios naturales

Los distintos usos recreativos y medioambientales del agua regenerada comprenden desde los estanques artificiales, al riego de campos de golf, pasando por una amplia gama de posibilidades, como entes ornamentales, producción de nieve artificial, creación de humedales para servir de refugio a la vida animal, o la creación de lagos en los que se pueda practicar la pesca y otras actividades.

Como en cualquier otra forma de aprovechamiento, el desarrollo de proyectos de carácter recreativo y medioambiental dependerá de otras demandas de agua, y también de la disponibilidad, a un coste asequible, de agua regenerada de la calidad adecuada. El nivel de tratamiento de las aguas deberá ser establecido en función de las posibilidades de contacto con las personas.

Los objetivos más frecuentes de los proyectos de reutilización en este campo, son la creación de un ambiente en el que pueda desarrollarse la vida salvaje, o bien la promoción recreativa o estética de un área determinada.

Los proyectos suelen dirigirse hacia las siguientes aplicaciones:

Creación o mejora de un hábitat húmedo.

Los humedales son objeto de una destrucción sistemática a causa de la evolución de otras actividades como la agricultura, la repoblación forestal y la urbanización. Sin embargo, estas zonas proporcionan muchos beneficios como la atenuación de las inundaciones, hábitats para las aves acuáticas y otros animales, recarga de acuíferos, etc, y potencian los procesos naturales que mantienen la calidad de las aguas. Además, las zonas húmedas regulan el equilibrio del ciclo hidrológico al actuar sobre la tasa de evapotranspiración y en algunos casos, la recarga subterránea.

Las aguas residuales tratadas pueden aplicarse en los humedales con tres finalidades:

- Crear, restaurar y/o mejorar los hábitats húmedos.
- Proporcionar un tratamiento adicional a las aguas, antes de su devolución al ciclo hidrológico.
- Proporcionar una alternativa de vertido en tiempo lluvioso para los sistemas de reutilización.



Ilustración 37.- Humedales naturales y/o artificiales.

Desarrollo de zonas recreativas y/o estéticas.

Los estanques de agua regenerada pueden tener un amplio abanico de finalidades, desde la puramente estética, en la cual el contacto del público con el agua está restringido, hasta la recreativa con aptitud para la navegación, pesca, e incluso el baño.

Conforme aumenta la posibilidad de contacto de las personas con el agua, aumenta el nivel de tratamiento exigido.

El aspecto general de las aguas debe también ser tenido en cuenta, con el fin de evitar crecimientos de algas, producción de olores y problemas derivados de la eutrofización de las aguas. El fósforo es el nutriente que mayor control requiere para evitar estos fenómenos.



Ilustración 38.- Estanques artificiales.

Estos estanques pueden incorporarse en ambientes urbanos, en campos de golf, o como elementos ornamentales en zonas residenciales. También pueden servir como instalación de almacenamiento de aguas para riego.

Mantenimiento de caudales en cauces naturales.

Esta práctica se diferencia de un vertido a cauce público en que se busca un beneficio final. Generalmente se persigue el mantenimiento de un caudal mínimo ecológico, o la mejora de la vida acuática, así como el mantenimiento y mejora de las condiciones estéticas de los cursos de agua. Esto puede ser necesario en periodos de sequía, en lugares donde se desaguan volúmenes importantes de los ríos, o en donde se produzcan problemas ambientales derivados de una velocidad de flujo demasiado baja.

Los requerimientos de calidad deberán tener en cuenta el uso prefijado que tendrían las aguas del cauce, el mantenimiento de la vida acuática, así como unos requisitos estéticos mínimos.

2.4.1.5. Recarga de acuíferos

Entre otros, los principales fines de la recarga de acuíferos empleando agua regenerada son:

- Establecer barreras contra la intrusión de agua salada en los acuíferos de zonas costeras.
- Utilizar el subsuelo como una matriz de tratamiento terciario del agua regenerada para su futura reutilización.
- Reponer las reservas de los acuíferos, tanto de agua potable como de agua no potable.
- Emplear el subsuelo como un almacén de agua regenerada.
- Controlar o prevenir los fenómenos de subsidencia.

Son numerosas las ventajas del empleo del agua depurada para la recarga de acuíferos. Con la infiltración y la percolación del agua regenerada se aprovecha la capacidad natural del subsuelo para la biodegradación y la filtración, suministrando de este modo un tratamiento in situ adicional, que se debe tener en cuenta dentro de la visión de conjunto de la administración de las aguas residuales.

La recarga implica una pérdida de la distinción entre agua regenerada y agua de acuíferos. Esto es un factor psicológico importante para la aceptación del agua

regenerada por una gran variedad de usuarios, incluyendo el suministro de agua potable.



Ilustración 39.- Recarga de acuíferos mediante canales de infiltración.

La recarga de acuíferos se puede considerar como un mecanismo de almacenamiento y transmisión subterránea del agua regenerada. La demanda de agua de riego es a menudo un fenómeno estacional que requiere grandes instalaciones de almacenamiento, u otros medios para la recogida del agua en épocas de baja demanda. Además, no siempre se dispone de lugares propicios para el almacenamiento del agua en superficie que sean económica y ambientalmente aceptables. La recarga de acuíferos reduce la necesidad de almacenamiento superficial, evitando las pérdidas por evaporación, el crecimiento de algas e insectos y la producción de malos olores. También los acuíferos cumplen la misión de sistema natural de distribución, y se reduce la inversión en sistemas de transmisión superficiales.

Por otro lado, la recarga con agua residual presenta también desventajas operacionales:

- Los sistemas de infiltración pueden requerir grandes extensiones de terreno, generalmente mayores que las empleadas en sistemas superficiales de suministro.

- La construcción de los pozos de inyección y la energía requerida para la recarga podrían suponer un elevado coste.
- La recarga con agua residual puede suponer un aumento del riesgo de contaminación de los acuíferos. Se debe tener en cuenta que recuperar un acuífero contaminado es un proceso largo y costoso.
- No todo el agua inyectada es recuperable.
- No se podría hacer frente a aumentos grandes y repentinos de la demanda, debido a la inercia del agua en el subsuelo.

También el destino de los contaminantes es una consideración importante al planear los sistemas de recarga que usan agua regenerada. Los contaminantes en el subsuelo están sujetos a multitud de procesos, hecho que dificulta el estudio del problema. En operaciones de difusión desde la superficie, la experiencia demuestra que la eliminación mayoritaria de constituyentes químicos y microbiológicos ocurre en los primeros 2 m de la cuenca de difusión. No obstante, es recomendable realizar un estudio detallado de la evolución en el subsuelo de los principales contaminantes.

Las limitaciones de la recarga están condicionadas por el uso que se le va a dar al agua, y por motivos de salud pública, de factibilidad económica, limitaciones físicas, restricciones legales, requerimientos de calidad de agua y cantidad de agua regenerada disponible. De todos estos factores, la salud pública es el más importante, pues condiciona todos los proyectos de esta naturaleza.

2.4.1.6. Adaptación a recursos de aguas potables

Como ya se ha citado, ésta es la aplicación de la reutilización de aguas residuales depuradas menos desarrollada hasta la fecha, debido al mayor número de controles que requiere y a la rigurosidad de los criterios de aceptación.

Habitualmente se distingue entre reutilización indirecta y reutilización directa. La reutilización indirecta consiste en descargar el agua tratada en un cauce y captarla más tarde, aguas abajo (o bien en un punto de gradiente hidráulico menor, si se ha evacuado en un acuífero), con el fin de ser incorporada a los recursos de agua potable. La reutilización directa consiste en incluir directamente en el sistema de abastecimiento el efluente obtenido en la planta de tratamiento, que se supone de calidad adecuada.

Los requerimientos de calidad que deben cumplir las aguas depuradas para aprovechamiento no potable, no parece que vayan a cambiar en el futuro; sin embargo, cuando el aprovechamiento es un abastecimiento de agua potable, los límites son mucho más estrictos, y el número de sustancias a controlar continúa aumentando espectacularmente en los últimos años. Paralelamente, las concentraciones admitidas han disminuido mucho.

En el pasado, muchas ciudades han tomado sus aguas de grandes ríos que, aunque recibían vertidos importantes de aguas residuales, empleaban para el abastecimiento, confiando la eliminación de patógenos a los tratamientos de filtración y desinfección. Esta práctica exige que los vertidos producidos aguas arriba se adapten a unas determinados niveles mínimos de calidad.

Los modernos proyectos de reutilización indirecta se basan en la aplicación de sistemas de recarga de acuíferos, con lo que se complementan los procesos de depuración con un tratamiento en el terreno.

Hasta ahora, la reutilización directa para agua potable de los efluentes de instalaciones de tratamiento no se realiza prácticamente en ningún lugar. Ello es debido fundamentalmente a la oposición del público, que muestra mejor disposición hacia otros usos del agua regenerada y que, en el caso de ser necesario su empleo para abastecimiento humano, prefiere los métodos de reutilización indirecta.

No obstante tenemos el caso único de reutilización potable directa que se da en la Estación de Regeneración Avanzada (ERA) de Goreangab en Windhoek, Namibia (Van der Merwe, et al., 2008). Se trata de una región en la que la escasez de agua es un problema acuciante. Además, en estos lugares, puede darse la circunstancia de que la calidad del agua regenerada sea analíticamente superior a la del agua potable obtenida desde fuentes superficiales, de tal manera que el agua regenerada esté considerada como la fuente de agua de mayor fiabilidad en la zona, insensible a la disminución de caudales prevista para la escorrentía superficial a consecuencia del aumento de temperatura provocado por el cambio climático.



Ilustración 40.- estación de regeneración avanzada de Goreangab (Namibia).

2.4.2. Tecnologías de tratamientos terciarios: Desinfección.

La Directiva 91/271 CEE al respecto de la necesidad de depurar las aguas residuales, así como su cumplimiento desde su promulgación, ha permitido que se pueda disponer de un caudal de agua depurada susceptible de ser reutilizado en diversos ámbitos.

El principal objetivo de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs) es la eliminación de determinados agentes contaminantes (sólidos en suspensión, materia orgánica, nutrientes) como paso previo a su vertido y restitución a los cauces naturales, en cumplimiento de los parámetros legales de control que dicha Directiva impone.

Los requisitos que deben cumplir, tanto los vertidos como las instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas, para que sean conformes a lo dispuesto en la Directiva 91/271/CEE aparecen descritos en las letras B y D de su Anexo I, y en los cuadros 1, 2 y 3 de este último. En la tabla 2 que se incluye a continuación aparecen resumidos dichos requisitos.

Tabla 2: REQUISITOS DE LOS VERTIDOS PROCEDENTES DE INSTALACIONES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS (DIRECTIVA 91/271/CEE)			
MEDIANTE TRATAMIENTO SECUNDARIO (a)			
Parámetros		Concentración	% mínimo de reducción (b)
DBO5 (c) (20° C sin nitrificación)		25 mg/L O2	70-90 %
DQO		125 mg/L O2	75 %
Total sólidos en suspensión		35 mg/L (d)	90 % (d)
(a) O pro ceso equivalente. Se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción.			
(b) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.			
(c) Este parámetro puede sustituirse por otro: carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO), si puede establecerse una correlación entre la DBO5 y el parámetro sustituto.			
(d) Este requisito es optativo. Los análisis de vertidos procedentes de sistemas de depuración por lagunaje se llevarán a cabo sobre muestras filtradas; no obstante, la concentración de sólidos en suspensión en las muestras de agua sin filtrar no deberá superar los 150 mg/L.			
EN ZONAS DE ALTA MONTAÑA (> 1.500 m) (a)			
Parámetros		Concentración	% mínimo de reducción (b)
DBO5 (c) (20° C sin nitrificación)		25 mg/L O2	40 %
DQO		125 mg/L O2	75 %
Total sólidos en suspensión	2.000-10.000 h-e	60 mg/L	70 %
	> 10.000 h-e	35 mg/L	90 %
(a) Tratamiento biológico o menos riguroso, según art. 5.3 RD-Ley 1/95. Se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción			
(b) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada			
(c) Este parámetro puede sustituirse por otro: carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO), si puede establecerse una correlación entre la DBO5 y el parámetro sustituto			
MEDIANTE TRATAMIENTO PRIMARIO			
Parámetros		% mínimo de reducción (a)	
DBO5		20%	
Total sólidos en suspensión		50%	
(a) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.			
MEDIANTE TRATAMIENTO MÁS RIGUROSO (Zonas Sensibles) (a)			
Parámetros	Concentración		% mínimo de reducción (b)
	10⁴ a 10⁵ h-e	> 10⁵ h-e	
Fósforo total	2 mg/L P	1 mg/L P	80 %
Nitrógeno total (c) (mg/L N)	15 mg/L N (d)	10 mg/L N	70-80 %
(a) Según la situación local se podrá aplicar uno o los dos parámetros. Se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción			
(b) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada			
(c) Nitrógeno total equivalente a la suma del nitrógeno Kjeldahl total (N orgánico y amoniacal), nitrógeno en forma de nitrato (NO3) y nitrógeno en forma de nitrito (NO2)			
(d) Estos valores de concentración constituyen medias anuales según el punto 3º del apartado A) 2 del Anexo III del RD. 509/96. No obstante, los requisitos relativos al nitrógeno pueden comprobarse mediante las medias diarias cuando se demuestre, que de conformidad con el apartado A) 1 del Anexo III se obtiene el mismo nivel de protección. En ese caso la media diaria no deberá superar los 20 mg/L de Nitrógeno total para todas las muestras, cuando la temperatura del efluente del reactor biológico sea superior o igual a 12 °C. En sustitución del requisito relativo a la temperatura, se podrá aplicar una limitación del tiempo de funcionamiento que tenga en cuenta las condiciones climáticas regionales medias diarias			

Cuando se pretende destinar el agua depurada a la reutilización en otros usos, se debe tener en cuenta los riesgos sanitarios y medioambientales que ello puede suponer. Es por este motivo que el número requisitos y de controles aumenta, y por tanto, el agua debe someterse a procesos de tratamiento adicionales para adecuar su calidad al uso previsto. Estos procesos adicionales son los llamados tratamientos de regeneración o tratamientos terciarios, cuyo principal objetivo es la reducción del número de organismos patógenos.

Los tres principales tipos de microorganismos deben ser eliminados con la desinfección son las bacterias, los virus y los protozoos:

Tabla 3: AGENTES POTENCIALMENTE INFECCIOSOS PRESENTES EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS NO TRATADAS (EPA_832-F-99-062, 1999)

Organismo	Enfermedad Causada
Bacterias	
Escherichia coli	Gastroenteritis
Leptospira (spp.)	Leptospirosis
Salmonella typhi	Fiebre tifoidea
Salmonella (2,100 serotipos)	Salmonelosis
Shigella (4 spp.)	Shigelosis (disentería bacilar)
Vibrio cholerae	Cólera
Protozoos	
Balantidium coli	Balantidiasis
Cryptosporidium parvum	Cryptosporidiasis
Entamoeba histolytica	Amebiasis (disentería amoébrica)
Giardia lamblia	Giardiasis
Helmintos	
Ascaris lumbricoides	Ascariasis
T. solium	Teniasis
Trichuris trichiura	Tricuriasis
Virus	
Virus entéricos (72 tipos)	Gastroenteritis, anomalías del corazón y meningitis
Hepatitis A	Hepatitis de tipo infeccioso
Agente de Norwalk	Gastroenteritis
Rotavirus	Gastroenteritis

En general los tratamientos terciarios constan de dos etapas: un tratamiento previo (o pretratamiento), seguido de un tratamiento de desinfección. El objetivo principal del pretratamiento es preparar el agua para una correcta desinfección. En esta etapa se eliminan principalmente sólidos y materia orgánica. La segunda etapa de desinfección tiene como objetivo la reducción de los niveles de patógenos, aunque teniendo especial cuidado en la posible generación de subproductos que puedan poner en riesgo el uso deseado.

Las tecnologías de tratamientos terciarios, al igual que las de depuración, pueden clasificarse en dos grandes categorías: tecnologías intensivas (o convencionales) y tecnologías extensivas (o no convencionales). Las tecnologías intensivas se caracterizan por necesitar muy poco espacio y requerir un gran aporte de energía, mientras que las tecnologías extensivas utilizan grandes superficies de terreno, pero en cambio el aporte de energía necesario es mucho menor. Las principales tecnologías de regeneración existentes se enumeran en la Tabla 4.

Tabla 4. Principales Tecnologías de Regeneración.

Proceso de Regeneración	Tipo	Tecnología
Pretratamiento	Físicos	Filtros de arena, ultrafiltración
	Físicos y Químicos	Coagulación, floculación y sedimentación/filtración
	Físicos y Biológicos	Infiltración-percolación, humedales artificiales
Desinfección	Físicos	Radiación Ultravioleta, Ósmosis Inversa
	Químicos	Cloración, Ozonización
	Biológicos	Sistemas Naturales (Lagunas de Maduración, Humedales Artificiales,...)

En determinados casos existen tratamientos secundarios capaces de generar efluentes con calidad suficiente para su reutilización en ciertos usos, como cabría mencionar en referencia a los biorreactores de membrana.

Las tecnologías de desinfección relacionadas poseen ciertas características determinadas que pueden resultar más adecuadas para un determinado proyecto de regeneración. Para su correcta elección se deben evaluar diversos condicionantes, tales como la calidad y el volumen de agua a regenerar, la calidad

final exigida, la eficiencia del sistema, el coste de implantación, el coste de explotación y mantenimiento, el impacto ambiental o la aceptación social (Gomez-Lopez, et al., 2009).

2.4.2.1. Cloración

El cloro es el desinfectante más usado para el tratamiento del agua residual doméstica porque destruye los organismos a ser inactivados mediante la oxidación del material celular (Ma, et al., 2013). El cloro puede ser suministrado en muchas formas que incluyen: el gas de cloro, las soluciones de hipoclorito y otros compuestos clorinados en forma sólida o líquida.



Ilustración 41.- Laberinto de cloración de una EDAR.

Las principales ventajas de la cloración son:

- Es una tecnología bien contrastada y ampliamente establecida.
- En la actualidad es más eficiente en términos de costo que otras tecnologías (excepto cuando la dechloración es requerida).
- El cloro residual, que permanece en el efluente puede prolongar el efecto de desinfección y puede ser medido para evaluar su efectividad.

- Es una tecnología confiable y efectiva para un amplio espectro de organismos patógenos.
- El cloro es efectivo en la oxidación de ciertos compuestos orgánicos e inorgánicos.
- Permite un control flexible de la dosificación.
- Puede eliminar ciertos olores molestos durante la desinfección.

Sin embargo la tecnología de la cloración también presenta los siguientes inconvenientes:

- El cloro residual, aún a bajas concentraciones, es tóxico a los organismos acuáticos y por ello puede requerirse la dechloración (Tang, et al., 2014).
- Todas las formas de cloro son muy corrosivas y tóxicas, por lo que el almacenamiento, el transporte y el manejo presentan riesgos cuya prevención requiere la aplicación de normas más exigentes de seguridad industrial.
- El cloro oxida ciertos tipos de materiales orgánicos del agua residual generando compuestos más peligrosos (tales como los metanos trihalogenados - MTH).
- El nivel total de sólidos disueltos se incrementa en el agua efluente.
- El cloro residual es inestable en presencia de altas concentraciones de materiales con demanda de cloro, por lo cual pueden requerirse mayores dosis para lograr una desinfección adecuada.
- Algunas especies parásitas han mostrado resistencia a dosis bajas de cloro.
- Se desconocen los efectos a largo plazo de la descarga de compuestos de la dechloración al medio ambiente.

2.4.2.2. Ozonización

El ozono se produce cuando las moléculas de oxígeno (O_2) son disociadas por medio de una fuente de energía produciendo átomos de oxígeno que posteriormente chocan con una molécula de oxígeno para formar un gas inestable, el ozono (O_3), que se utiliza para desinfección de las aguas residuales. La

mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales generan ozono mediante la aplicación de una corriente alterna de alto voltaje (6 a 20 kilovoltios) a través de una brecha entre placas dieléctricas de descarga en donde se encuentra un gas de alimentación que contiene el oxígeno. El ozono es generado en la planta debido a que el gas es inestable y se descompone en oxígeno elemental en un período corto de tiempo luego de su generación (EPA_832-F-99-063, 1999).



Ilustración 42.- Proceso de generación del ozono (Fernández Troyano, 2014).

Cuando este gas es inyectado en el agua, puede ejercer su poder oxidante mediante dos mecanismos de acción (Pérez Calvo, 2006):

1. Oxidación directa de los compuestos mediante el ozono molecular.
2. Oxidación por radicales libres hidroxilo.

De los oxidantes más utilizados en el tratamiento de aguas, los radicales libres de hidroxilo y el ozono tienen el potencial más alto (son los más oxidantes). Ello explica la gran eficacia del ozono como desinfectante, así como su capacidad para oxidar materia orgánica del agua, eliminar olores y sabores desagradables, y degradar compuestos químicos de diversa naturaleza (Rosenblum, et al., 2012).

Principales ventajas:

- El ozono es más eficaz que la utilización del cloro para la desinfección o destrucción de virus y bacterias.
- El proceso de ozonización utiliza un período corto de contacto aproximadamente de 10 a 30 minutos).
- No existen residuos peligrosos que necesiten ser removidos después del proceso de ozonización porque el ozono se descompone rápidamente.
- Después del proceso de ozonización, los microorganismos no crecen nuevamente, a excepción de aquellos que están protegidos por las partículas en la corriente de agua residual.
- El ozono es generado dentro de la planta, existiendo así muy pocos problemas de seguridad industrial asociados con el envío y el transporte.
- El proceso de ozonización eleva la concentración de oxígeno disuelto (O.D.) del efluente. El incremento O.D. puede eliminar la necesidad de reaeración y también puede incrementar el nivel de O.D. en la corriente de agua receptora.

Principales desventajas:

- La baja dosificación puede no desactivar efectivamente algunos virus, esporas o quistes.
- El proceso de ozonización es una tecnología más compleja que la cloración o la desinfección con luz ultravioleta, por lo cual se requieren equipos complicados y sistemas de contacto eficientes.
- El ozono es muy reactivo y corrosivo, requiriendo así de materiales resistentes a la corrosión tales como el acero inoxidable.
- El proceso de ozonización no es económico para las aguas residuales con altas concentraciones de sólidos suspendidos (SS), demanda bioquímica del oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), o carbono orgánico total (COT).

- El ozono es extremadamente irritante y posiblemente tóxico, así que los gases de escape que salen de la cámara de contacto deben ser destruidos para evitar que los trabajadores estén expuestos a ellos.
- El costo del tratamiento puede ser relativamente alto en cuanto a la inversión de capital y la demanda de energía eléctrica.
- En algunos casos puede requerirse la remoción del ozono residual.
- Otra consideración referente al costo es que cada sistema de ozonización es muy específico para cada caso, dependiendo de las limitaciones del efluente de la planta. Debe contactarse con empresas de suministro de sustancias químicas para obtener información específica de los costos.

2.4.2.3. Rayos Ultravioletas

El sistema de desinfección con luz ultravioleta (UV) transfiere energía electromagnética desde una lámpara de vapor de mercurio al material genético del organismo (ADN o ARN). Cuando la radiación UV penetra en las paredes de la célula de un organismo, ésta destruye la habilidad de reproducción de la célula. La radiación UV, generada por una descarga eléctrica a través de vapor de mercurio, penetra en el material genético de los microorganismos y retarda su habilidad de reproducción (Guo, et al., 2013).



Ilustración 43.- Módulo de desinfección UV.

La eficacia del sistema de desinfección con luz ultravioleta depende de las características del agua residual, la intensidad de la radiación, el tiempo de exposición de los microorganismos a la radiación y la configuración del reactor. Para cualquier planta de tratamiento, el éxito de las actividades de desinfección está directamente relacionado con la concentración de componentes coloidales y de partículas en el agua residual.

Los componentes principales del sistema de desinfección con luz UV son las lámparas de vapor de mercurio, el reactor y los balastos electrónicos (ballasts). La fuente de luz UV son las lámparas de arco de mercurio de baja o mediana presión, bien sea de intensidad baja o alta.

La longitud de onda óptima para desactivar eficazmente los microorganismos se encuentra en el rango de 250 a 270 nm. La intensidad de la radiación emitida por la lámpara se disipa a medida que la distancia a la lámpara aumenta.

Las lámparas de baja presión emiten básicamente luz monocromática a una longitud de onda de 253.7 nm (nanómetros). Las longitudes estándar de las lámparas de baja presión son de 0.75 y 1.5 metros, y sus diámetros van de 1.5 a 2.0 cm. La temperatura ideal de la pared de la lámpara se encuentra entre 95 y 122° F.

Las lámparas de mediana presión son generalmente utilizadas en instalaciones de mayor tamaño. Estas lámparas de luz UV tienen una intensidad germicida aproximadamente 15 a 20 veces mayor que las lámparas de baja presión. La lámpara de mediana presión desinfecta más rápido y tiene más capacidad de penetración debido a su mayor intensidad. Sin embargo, estas lámparas operan a temperaturas más altas con un mayor consumo de energía eléctrica.

Existen dos tipos de configuraciones de reactor para el sistema de desinfección con luz UV:

- de contacto, y
- sin contacto.

En ambos casos, el agua residual puede fluir en forma perpendicular o paralela a las lámparas. En el caso del reactor de contacto, la serie de lámparas de mercurio está recubierta con mangas de cuarzo para minimizar los efectos de enfriamiento del agua residual.

En el caso del reactor sin contacto, las lámparas de luz UV se encuentran suspendidas afuera de un conducto transparente que transporta el agua residual que va a ser desinfectada. Esta configuración no es tan común como la configuración del reactor de contacto. En ambos tipos de reactores, el balastro –o caja de control– proporciona el voltaje de inicio para las lámparas y mantiene una corriente continua.



Ilustración 44.- Esquema de un reactor UV.

Ventajas:

- La desinfección con luz UV es eficaz para la desactivación de la mayoría de los virus, esporas y quistes.
- Es más un proceso físico que una desinfección química, lo cual elimina la necesidad de generar, manejar, transportar, o almacenar productos químicos tóxicos, peligrosos o corrosivos.
- No existe ningún efecto residual que pueda afectar a los seres humanos o cualquier organismo acuático.
- Es de uso fácil para los operadores.
- Tiene un período de contacto más corto en comparación con otros desinfectantes (aproximadamente de 20 a 30 segundos con la utilización de las lámparas de baja presión).
- Requiere menos espacio que otros métodos.

Desventajas:

- La baja dosificación puede no desactivar efectivamente algunos virus, esporas y quistes.

- Algunas veces los organismos pueden reparar o invertir los efectos destructivos de la radiación UV mediante un “mecanismo de reparación”, también conocido como fotoreactivación o, en ausencia de radiación, como “reparación en oscuro”.
- Se requiere un programa de mantenimiento preventivo para controlar la acumulación de sólidos en la parte externa de los tubos de luz.
- La turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST) en el agua residual hacen que la desinfección con luz UV sea ineficaz. El uso de la desinfección con lámparas UV de baja presión no es tan efectivo en el caso de efluentes secundarios con niveles de SST mayores a 30 mg/L.
- La desinfección con luz UV no es tan económica como la desinfección con cloro, pero los costos son competitivos cuando la cloración requiere de cloración.

2.4.2.4. Membranas de filtración

El empleo de membranas para la eliminación o reducción de microorganismos patógenos de las aguas residuales se ha convertido en una parte importante de la tecnología de separación en los últimos decenios (Diez González & de la Macorra García, 2014).

La tecnología de membrana consiste en una serie de procesos de separación diferentes y cuya principal característica es que trabaja sin la adición de productos químicos y con un uso relativamente bajo de energía.

La membrana actúa como un filtro muy específico que dejará pasar el agua, funciona como una pared de separación selectiva, mientras que los sólidos suspendidos y otras sustancias que no atraviesan la membrana, quedan retenidos. Hay varios métodos para permitir que las sustancias atraviesen una membrana, la aplicación de alta presión, el mantenimiento de un gradiente de concentración en ambos lados de la membrana o la introducción de un potencial eléctrico.

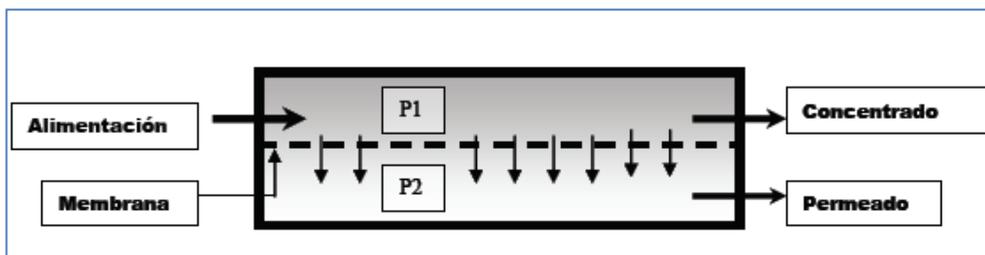


Ilustración 45.- Diagrama conceptual de un sistema de separación por membranas (P1>P2). (González Gálvez, 2007).

Para considerar los efectos de la desinfección de las membranas, se deben comparar el tamaño de los poros de los diferentes tipos, con los tamaños de los microorganismos a eliminar.

um	0.001	0.01	0.1	1.0	10	100	1000
A	10	100	1000	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷
Peso molecular	100	200	5,000	20,000	100,000	500,000	
Tamaños relativos De diferentes partículas	Sales acuosas Iones metálicos azúcares	Pirógenos	Carbon negro Virus Silice coloidal Proteínas	Pigmentos de pintura	Bacteria	Celulas de lev. Pólen	Arena de playa
Tecnología de Filtración	Osmosis Inversa		Ultrafiltración		Microfiltración		Filtración de partículas

Ilustración 46.-Espectro de filtración. (Fuente: <http://procesosbio.wikispaces.com>)

Actualmente existen básicamente cuatro tipos de membranas en el mercado, cada una remueve tipos o tamaños ligeramente diferentes de substancias

presentes en el agua. Las diferencias entre cada una de las tecnologías, vienen dadas por el tamaño de poro, en microfiltración comprende rangos de hasta 0,1 micras, ultrafiltración hasta 0,01 micras, nanofiltración hasta 0,001 micras y osmosis inversa hasta 0,0001 micras (Zhou & Smith, 2001). En el caso de micro y ultrafiltración, las presiones de trabajo son más bajas y hay un mayor flujo de producción y en el caso de nanofiltración, osmosis y electrodesionización, las presiones de trabajo son mayores y el flujo de producción es menor.

Por otro lado, los virus tienen tamaños con rango entre 10 y 25 nm (nanómetros), las bacterias entre 0,5 y 5 μm (micrómetros), y los protozoos entre 5 y 600 μm . El fitoplancton entre 2 y 20 μm , y las algas entre 13 y 200 μm (Hernández Muñoz, 2001).

2.4.2.5. Sistemas naturales

Las reacciones fotoquímicas inducidas por la luz natural se conocen y se aplican desde hace tiempo. Las lagunas de maduración, y más recientemente los humedales artificiales, se muestran como sistemas naturales a tener en cuenta la desinfección de aguas residuales tratadas para su reutilización en muchos casos especiales (Zurita & White, 2014), Estos sistemas han demostrado ser eficientes en la eliminación no sólo los parámetros convencionales de calidad del agua, sino también en la eliminación de numerosos contaminantes orgánicos emergentes (Avila, et al., 2013).

Lagunas de maduración

Los sistemas de lagunaje, son una tecnología de tratamiento de aguas residuales, que se ha venido aplicando particularmente donde la disponibilidad de terrenos no era un problema. Entre los tipos de lagunas que por lo general se diseñan en este tipo de tecnologías, es habitual incluir al final del tratamiento una o varias lagunas de maduración como tratamiento terciario.

Estas lagunas de maduración son estanques poco profundos, normalmente de 0,8 a 1,0 m de profundidad total, donde las reacciones características que se producen son principalmente tres: una fuerte acción fotosintética, una oxidación y una acción de desinfección por las radiaciones ultravioletas solares. (Hernández Muñoz, 2001). Con estos procesos se consigue una más que satisfactoria

capacidad de reducción de bacterias, virus y otros elementos patógenos como huevos de nematodos (Hijosa-Valsero, et al., 2010).

Es imprescindible una buena gestión evitando los caminos preferenciales y retirando excesos de formaciones de algas que puedan impedir la penetración de las radiaciones solares. Su principal problema, como ya he indicado, es la superficie que ocupan, no obstante, en la actualidad, se está recuperando esta tecnología, como tratamiento terciario o parte del mismo, en general disponiendo únicamente estanques de maduración después de un tratamiento intensivo convencional.

Humedales artificiales (Wetlands)

Los Humedales Artificiales se basan en la utilización de plantas emergentes para la depuración de las aguas residuales, reproduciendo artificialmente las condiciones propias de las zonas húmedas naturales.

Las plantas acuáticas emergentes (carrizos, juncos, aneas, etc.), son plantas anfibas que se desarrollan en aguas poco profundas, arraigadas al subsuelo, que presentan una elevada productividad y que toleran bien las condiciones de falta de oxígeno que se producen en suelos encharcados, al poseer canales o zonas de aireación (aerénquima), que facilitan el paso del oxígeno (producido por fotosíntesis) hasta las raíces.



**Ilustración 47.- Humedal Artificial de juncos.
(Fuente: www.bastan.es).**

Los mecanismos por los que las plantas emergentes contribuyen a la depuración de las aguas residuales se basan en los principios siguientes:

Eliminación de sólidos en suspensión: tiene lugar, principalmente, por fenómenos de filtración a través del conjunto que forman el sustrato (sobre el que crecen las plantas) y las raíces.

Eliminación de materia orgánica: se basa en la acción de microorganismos (principalmente bacterias), que en estos sistemas presentan actividades y desarrollos muy elevados. Las plantas actúan como sistema de aireación, suministrando, a través de sus raíces, el oxígeno necesario para las bacterias que viven en el sustrato, responsables de la degradación aerobia de la materia orgánica.

En zonas profundas pueden darse condiciones de ausencia de oxígeno produciéndose degradaciones anaerobias.

Eliminación de nitrógeno: se lleva a cabo por diferentes vías:

- absorción directa por las plantas
- procesos de nitrificación-desnitrificación, que se ven favorecidos por la existencia de zonas aerobias y anaerobias

Eliminación de fósforo: se produce mediante:

- absorción directa por las plantas
- fenómenos de adsorción sobre los componentes del suelo

En el caso del fósforo tiene menor importancia la absorción del mismo por las plantas, siendo los fenómenos físico-químicos los que juegan el papel principal en su reducción.

Eliminación de patógenos: se logra por diferentes mecanismos, destacando entre ellos:

- la adsorción sobre las partículas del sustrato
- la toxicidad que sobre los organismos patógenos ejercen los antibióticos producidos por las raíces de las plantas
- la acción depredadora de bacteriófagos y protozoos

Dependiendo de si el agua a tratar circula a través de los humedales superficialmente (por encima del sustrato) o de forma subterránea (a través del sustrato), los humedales artificiales se clasifican en:

Humedales Artificiales de Flujo Libre. Este tipo de Humedales, que se pueden emplear tanto como tratamiento secundario o como tratamiento avanzado de las aguas residuales, consta de un conjunto de balsas o canales paralelos, con

vegetación emergente (aneas, carrizos, juncias, juncos, etc.) y niveles de agua poco profundos (0,1-0,6 m).

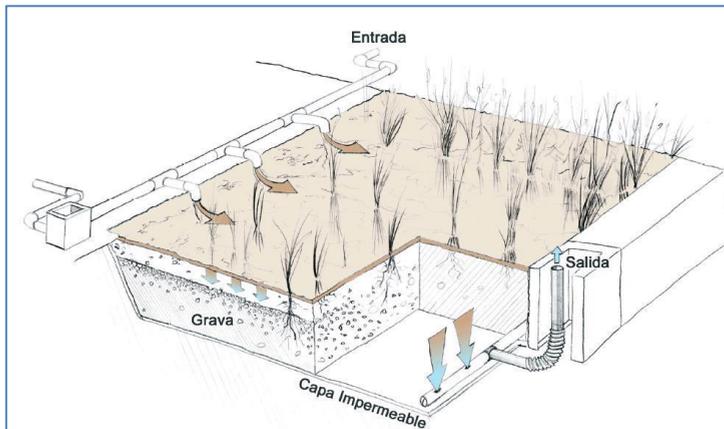


Ilustración 48.- Humedal Artificial de Flujo Libre.
(Fuente: www.depuranatura.org).

Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal. En este tipo de Humedales (que también puede emplearse como tratamiento secundario o avanzado), el agua residual pretratada fluye a través de un medio poroso (arena, grava), confinado en un canal impermeable, y en el que se implanta vegetación emergente, generalmente carrizo (*Phragmites australis*). El sentido de flujo es horizontal.

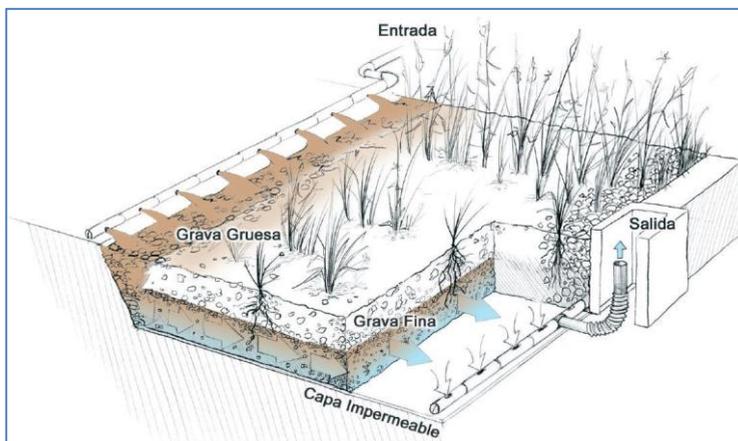


Ilustración 49.- Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal.
(Fuente: www.depuranatura.org).

Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical. En este tipo, las aguas residuales se alimentan superficialmente. Las aguas percolan verticalmente a través de un sustrato inerte (arenas, gravas), y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del Humedal, que conecta con chimeneas de aireación. La alimentación se efectúa de forma intermitente, para preservar las condiciones aerobias.

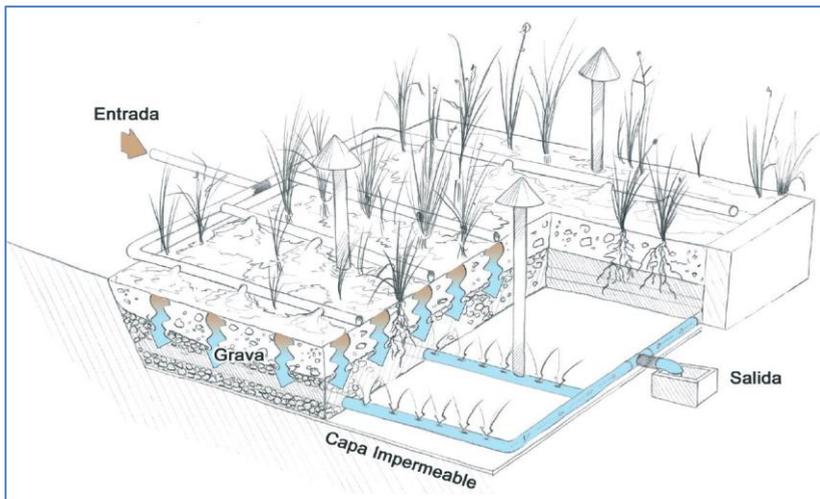


Ilustración 50.- Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical.
(Fuente: www.depuranatura.org).

CAPÍTULO 3:

PROPUESTA METODOLÓGICA

CAPÍTULO 3: PROPUESTA METODOLÓGICA.

La metodología propuesta consiste en el establecimiento de un sistema experto que proporcione a los administradores de proyectos una herramienta útil para la selección de una tecnología óptima de desinfección de aguas residuales tratadas para su posterior reutilización. Dicha metodología tiene como objetivo el que sea capaz de evaluar múltiples alternativas que implican diferentes criterios de decisión tanto cuantificables como no cuantificables (Zhang, et al., 2013).

El sistema experto propuesto es un método híbrido que combina tres técnicas: el método Delphi, el Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP) con y la técnica VIKOR. El método Delphi se desarrolla para facilitar un soporte eficiente del proceso dinámico de obtención de datos mediante un panel de expertos. Esta técnica combinada con el procedimiento AHP es capaz de hacer frente a criterios cuantificables tradicionales, como los relacionados con los costes, así como otros relacionados con la sostenibilidad del sistema, la fiabilidad, los riesgos para la salud humana y para el medio ambiente, los aspectos sociales y otros criterios no cuantificables. Por último, mediante la aplicación de la técnica VIKOR se encuentra aquella solución de compromiso que está más cerca de la ideal en el proceso de toma de decisiones frente a criterios contradictorios. Esta solución de compromiso proporciona la máxima utilidad de la mayoría, y el uso mínimo de la oponente.

En el presente apartado se exponen las tres técnicas que de forma combinada han sido empleadas en la investigación, así como los procedimientos que han sido aplicados en el posterior desarrollo práctico de la metodología propuesta.

3.1. El método Delphi

3.1.1. Definición del método

El método Delphi es una técnica de investigación social que trata de obtener una opinión fiable de un conjunto de expertos. Se trata un método de estructurar la comunicación entre un grupo de individuos que pueden aportar una ayuda valiosa para resolver un problema complejo (Landeta, et al., 2011). Se clasifica como uno de los métodos generales de prospectiva, que busca acercarse al consenso de un

grupo de expertos con base en el análisis y la reflexión de un problema definido (Varela-Ruiz, et al., 2012)

El nombre "Delphi" fue escogido para hacer mención a la ciudad de la antigua Grecia, Delfos, dónde era célebre el oráculo que habitaba en el templo y adivinaba el futuro.



Ilustración 51.- Oráculo de Delfos en Grecia.

El método fue ideado originalmente a comienzos de los años 50 en el seno del Centro de Investigación estadounidense *RAND Corporation*

como un instrumento para realizar predicciones sobre un caso de

catástrofe nuclear. Desde entonces, ha sido utilizado frecuentemente en los ámbitos académicos y empresariales y se ha empleado principalmente como una técnica para la planificación y el consenso en situaciones de incertidumbre en los que no es posible utilizar otras técnicas basadas en información objetiva. Su flexibilidad y simplicidad han llevado a su aplicación exitosa en diferentes contextos geográficos y temáticos (Landeta, 1999).

3.1.2. Características principales

Las características clave que determinan un procedimiento Delphi son cuatro: el anonimato, la iteración, la retroalimentación controlada, y la agregación estadística de las respuestas del grupo (Rowe & Wright, 1999).

- **El anonimato** se logra mediante el uso de cuestionarios. Al permitir a los miembros individuales del grupo la oportunidad de expresar sus opiniones y juicios de forma privada, se evitan posibles presiones sociales debidas a individuos dominantes, o presiones dogmáticas, o de una cierta mayoría. Idealmente, esto permite que los miembros individuales del grupo consideren cada idea de forma independiente en base a su propio criterio, en lugar de sobre la base de criterios potencialmente no válidos. Además, con la versión del cuestionario sobre un número de rondas, se les da la oportunidad a los individuos de cambiar sus opiniones y juicios sin temor a quedar mal a los ojos de los demás miembros del grupo.

- **La iteración** en el proceso obliga a que los expertos deban ser consultados al menos dos veces sobre la misma cuestión. De este modo pueden reflexionar y reconsiderar sus respuestas, con la ayuda de la información que reciben del resto de los expertos, o bien argumentar las propias. Por otra parte, al emitir sus respuestas en más de una ocasión se consigue una mayor estabilización de las opiniones de cada experto.
- **La retroalimentación controlada** (feedback) se realiza entre cada iteración o cuestionario, de tal manera que los miembros del grupo son informados de las opiniones de sus colegas de forma anónima, para así poder reflexionar y reconsiderar, en su caso, las opiniones emitidas. A menudo esta retroalimentación se presenta como un resumen estadístico simple de la respuesta del grupo. En ocasiones, la información adicional también puede proporcionar los argumentos de las personas cuyos juicios quedan fuera de ciertos límites preestablecidos. De esta manera, la retroalimentación comprende las opiniones y juicios de todos los miembros del grupo y no sólo de la mayoría de ellos. Esta retroalimentación se lleva a cabo por medio de un coordinador del grupo de estudio, por lo que toda la información no pertinente es eliminada.
- **La respuesta estadística del grupo** se produce debido a que, al concluir el proceso, todas las opiniones forman parte de la respuesta final, es decir, después de varias rondas de iteración de los cuestionarios, se toma el promedio de los juicios de los expertos, que posteriormente se procesarán cuantitativa y estadísticamente. Este resultado puede así ser visto como una ponderación equitativa de todas las opiniones de los miembros del grupo.

3.1.3. Procedimiento: Fases del método

El proceso operativo del Método Delphi, para garantizar la calidad de los resultados, se puede desglosar de forma resumida en las siguientes fases:

1. **La formulación del problema:** Cuando se pretende encontrar una respuesta o un consenso sobre un determinado tema, el primer paso es la realización de una revisión bibliográfica del mismo, seguidamente, si se establece que no existe acuerdo entre investigadores sobre el problema y

se procede a la construcción de la pregunta de investigación (Varela-Ruiz, et al., 2012).

Se trata de una etapa fundamental en la realización de un Delphi. En un método de expertos, la importancia de definir con precisión el campo de investigación es muy grande por cuanto que es preciso estar muy seguros de que los expertos reclutados y consultados poseen todos la misma noción de este campo (Astigarriaga, 2000).

- 2. La elección del panel de expertos:** Los expertos asumen la responsabilidad de emitir juicios y opiniones, que son las que constituyen el eje del método (Varela-Ruiz, et al., 2012). En todas las investigaciones basadas en el Método Delphi, el rol que ejerce cada participante es crucial, por tanto, todos deben ser especialistas en el campo determinado que se estime necesario.

Esta fase presenta dos dimensiones:

- **Dimensión Cualitativa:** Los expertos se seleccionan en función del objetivo prefijado y atendiendo a criterios de experiencia, posición, responsabilidad, acceso a la información y disponibilidad.
- **Dimensión Cuantitativa:** La elección del tamaño de la muestra dependerá de los recursos, medios y tiempo disponible.

La dimensión cualitativa es de especial relevancia debido a que el término de "experto" es ambiguo. Con independencia de sus títulos, su función o su nivel jerárquico, el experto debe ser elegido por su capacidad de encarar el futuro y por sus conocimientos sobre el tema consultado. Por tanto se puede definir como "experto" aquel individuo cuya situación y recursos personales le posibiliten contribuir positivamente a la consecución del fin que motiva el trabajo-

Según el problema a analizar la composición del grupo será distinta, por lo que en base a estas premisas se pueden distinguir los siguientes tipos de expertos:

- Especialistas con conocimientos, experiencia y objetividad: preponderantes cuando se necesita información sobre cómo actuar o sobre la evolución futura de hechos
- Afectados: de vital importancia cuando hay conflicto de intereses sobre la dirección que deben tomar las acciones
- Facilitadores con capacidad para sintetizar, clarificar y organizar: Especialmente adecuados cuando los hechos o las relaciones no están claros.

Los criterios a aplicar para una selección óptima pueden resumirse en los siguientes:

- Nivel de conocimientos y capacidad predictiva
- Grado de afectación por las consecuencias del proyecto
- Capacidad facilitadora y grado de motivación
- Otros: coste, proximidad,....

En referencia a la dimensión cuantitativa, el número de expertos también depende de los objetivos y presupuesto de cada estudio. En general, se considera que no deben ser menos de siete expertos y el máximo se considera alrededor de treinta.

Para evitar el abandono de expertos desde la primera comunicación con ellos, se debe incluir información escrita sobre los objetivos del estudio, los pasos del método, el número de cuestionarios o preguntas, el tiempo para contestarlos, la duración del proceso, la potencial utilidad de los resultados y el beneficio, que obtienen al participar. Independientemente del medio que se utilice para llevarla a cabo (teléfono, electrónico, correo o personal).

3. La elaboración y el lanzamiento de los cuestionarios

La elaboración de los cuestionarios debe estar enfocada a facilitar las respuestas de los expertos tanto como la investigación en curso lo permita.

Estas respuestas han de poder ser cuantificadas y ponderadas, por lo que se formularán cuestiones relativas al grado de ocurrencia (probabilidad) o de importancia (prioridad). Es por ello que habitualmente se dispongan respuestas categorizadas del tipo: Si/No; Mucho/Medio/Poco; Muy de acuerdo/ De acuerdo/ Indiferente/ En desacuerdo/Muy en desacuerdo, y después se tratan las respuestas en términos porcentuales tratando de ubicar a la mayoría de los consultados en una de las categorías propuestas (Astigarriaga, 2000).

Existen diferentes medios para realizar las preguntas y recibir las respuestas: reuniones presenciales, correo postal o nuevas tecnologías de información y comunicación. Dado el desarrollo actual de las comunicaciones, es frecuente que los cuestionarios se administren por correo electrónico o fax, teniendo estos medios como ventaja su rapidez, especialmente cuando los expertos son internacionales.

Con estas premisas se desarrollan, en general, las siguientes etapas básicas:

Etapas

Etapas 1

Esta primera etapa del proceso habitualmente se abre con un cuestionario de respuesta abierta. Este cuestionario será la piedra angular del tipo de solicitud de información específica sobre un tema al panel de expertos. Tras recibir las respuestas de los sujetos, los investigadores precisan convertir la información recibida en un cuestionario estructurado convenientemente. Dicho cuestionario se usa como herramienta de encuesta para la segunda etapa de recopilación de información. Debe señalarse que existe una modificación comúnmente aceptada y usada de este formato de Delphi, en la que se usa un cuestionario pre estructurado que se basa en una revisión amplia de la literatura que exista al respecto.

Etapas 2

Una vez recibidas estas respuestas iniciales el investigador debe revisar y sintetizar las opiniones vertidas por los expertos y proceder a elaborar el segundo cuestionario con preguntas claras y precisas.

En esta etapa se tiene que contar con reactivos de respuesta cerrada para obtener resultados objetivos que posibiliten su integración numérica. Con estos reactivos se solicita a cada uno de los expertos una de las siguientes acciones:

- a) Jerarquización: con indicaciones precisas, por orden de importancia en relación con la situación del estudio.
- b) Valoración: ofreciendo puntuaciones de acuerdo a una escala definida.
- c) Comparación: en forma de pares de acuerdo al criterio establecido.
- d) Estimaciones cuantitativas

El resultado de esta segunda etapa, está dirigido a identificar las áreas de acuerdo y desacuerdo. En ocasiones, se puede solicitar a los expertos que aleguen los motivos que fundamentan su elección de prioridades.

Es en esta etapa donde comienza a construirse el consenso.

Etapas 3

En la tercera etapa, cada experto recibe un cuestionario que incluye los resultados de la etapa anterior, ofreciendo a los participantes la oportunidad de hacer aclaraciones tanto sobre la información objetiva facilitada como sobre sus propios juicios acerca de la importancia relativa de cada una de las respuestas, pidiéndoles que revisen sus dictámenes o que especifiquen las razones que explican su negación del consenso, en su caso.

Sin embargo, en comparación con la ronda previa, solo debería haber un ligero incremento del grado de consenso esperado.

Las respuestas de los expertos recibidas individualmente deben ser integradas, ya sea para una nueva retroalimentación o feedback de las fases intermedias o para la presentación de los resultados finales.

Etapa 4

El objetivo de los cuestionarios sucesivos es disminuir la dispersión de las opiniones y aproximarse a una opinión media consensuada. Debe recordarse que el número de iteraciones en Delphi depende en buena medida del grado de consenso buscado por los investigadores. Por lo general, el criterio práctico para finalizar el proceso, es utilizar dos o tres rondas de envío y recepción de información, aunque lo más indicado es aplicar el criterio de estabilización. Cuando después de dos rondas sucesivas ha disminuido el coeficiente y es menor al nivel prefijado, se determina que se ha alcanzado una estabilidad satisfactoria y se da por terminado el proceso.

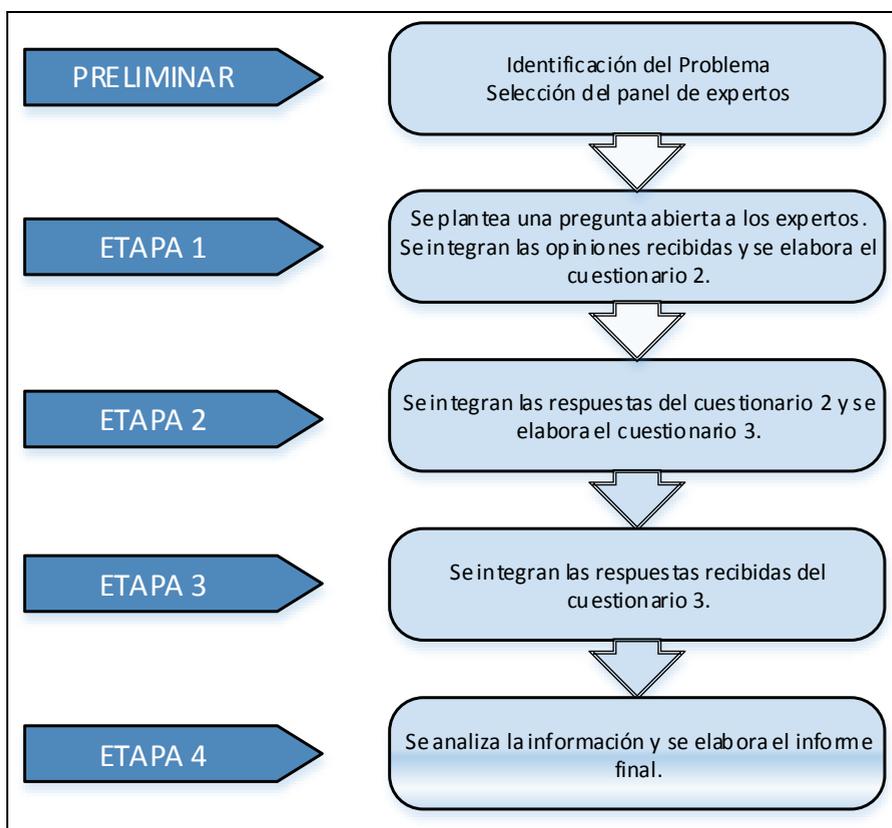


Ilustración 52.- Etapas básicas de la técnica Delphi

Es importante señalar, que tanto en los resultados parciales como en el resultado final, es conveniente observar cómo varían las respuestas de cada pregunta como orientación para determinar el número de rondas necesarias. Además, cabe observar que el panel de expertos no tiene por qué comportarse como un todo único. Motivos geográficos, culturales, profesionales o políticos pueden ocasionar que se formen subgrupos con respuestas características (Varela-Ruiz, et al., 2012).

El informe final de resultados debería incluir entre otros la descripción del estudio (objetivos, método, cuestionarios), las características del panel de expertos, la manera en que evolucionan las respuestas de los expertos en las distintas rondas, las opiniones mayoritarias, el nivel de consenso alcanzado y aquellas posiciones significativas no mayoritarias. También se incluyen los análisis estadísticos y las conclusiones en torno a los comportamientos diferenciados, en el caso de detectarse subgrupos dentro del panel.

3.2. El método AHP

3.2.1. Los problemas de decisión multicriterio

Los problemas de decisión multicriterio se han venido analizando tradicionalmente en base a un modelo que puede ser esquematizado de la siguiente forma (Garza-Ríos, 2014):

- Se selecciona el criterio bajo el cual se desea decidir la mejor solución.
- Se define el conjunto de restricciones que limitan la solución del problema.

A continuación mediante el uso de técnicas más o menos sofisticadas, se puede proceder a buscar entre las posibles soluciones aquella que obtenga un mejor valor del criterio seleccionado, a lo cual se ha venido a denominar solución óptima.

Por tanto, las posibles soluciones de consenso según esta estructura son aquellas que dan debido cumplimiento al conjunto de restricciones del problema y que por

ello representan los mejores valores del criterio seleccionado por el tomador de decisiones.

Aunque este esquema posee una gran solidez desde el punto de vista lógico se debe destacar que posee importantes debilidades que lo desvían notablemente de los procesos reales de toma de decisiones. Esto sucede porque en la realidad, los tomadores de decisión no están exclusivamente interesados en buscar la solución con respecto a un único criterio, sino que desean efectuar esta tarea en relación a distintos criterios que puedan reflejar sus preferencias con mayor aproximación.

Dentro de este marco, es de vital importancia contar con la información adecuada para tomar la mejor decisión. Ésta se determinará dentro de un conjunto de posibles alternativas, las cuales deben ser evaluadas frente a múltiples criterios que se definan para este propósito (Osorio-Gómez & Orejuela-Cabrera, 2008). Así, el resultado es un proceso complejo y delicado en el cual la subjetividad y la dependencia de dicha información necesaria hace que se precise contar con herramientas que mejoren este proceso y permitan un análisis más científico de las alternativas (Saaty, 1980).

Este método puede considerarse, según la orientación dada al mismo, de muy diversas maneras. Su contribución es importante en niveles operativos, tácticos y estratégicos, sirviendo para mejorar el proceso de decisión debido a la gran información que aporta y a la mejora en el conocimiento del problema.

La complejidad de estos problemas de decisión multicriterio ha llevado al desarrollo de modelos de preferencia, es decir, de herramientas que permitan abordar los mismos de una forma sistemática y científica, buscando favorecer el proceso y ayudar a quienes tienen la responsabilidad de la toma de decisiones. Entre estos modelos de preferencia, se sitúa de forma destacada el Proceso Analítico Jerárquico, en adelante denominado AHP por sus siglas procedentes del nombre en inglés Analytical Hierarchy Process. Este método, facilita la toma de decisiones en problemas en los cuales se involucran múltiples criterios (Brysonand & Mobolurin, 1994).

3.2.2. Fundamentos del AHP

El Proceso Analítico Jerárquico fue desarrollado por Thomas Saaty durante los años 70, quien a partir de sus investigaciones en el campo militar, así como de su experiencia docente, formuló una herramienta sencilla para ayudar a las personas responsables de la toma de decisiones. Su simplicidad y su poder han sido evidenciados en las cientos de aplicaciones en las cuales se han obtenido importantes resultados y en la actualidad, es la base de muchos paquetes de software diseñados para los procesos de tomas de decisiones complejas (Osorio-Gómez & Orejuela-



Ilustración 53.- Thomas Saaty.

Cabrera, 2008). Además, ha sido adoptado por numerosas compañías para el soporte de los procesos de toma de decisiones complejas e importantes.

En esencia el método AHP fue creado como un modelo matemático para evaluar alternativas cuando se tienen en consideración varios criterios evitando una excesiva simplificación e identificando y evaluando costes y beneficios (Saaty, 2012).

Está basado en el principio que la experiencia y el conocimiento de los expertos en una determinada materia son tan importantes como los datos utilizados en el proceso.

El objetivo principal del método es la estructuración de un problema de decisión a través de una serie de matrices de comparaciones por pares entre los elementos de decisión para obtener sus prioridades (Srdjevic, et al., 2013).

Para entender mejor el método, a continuación se describe sucintamente los tres pilares básicos en los que se fundamenta (Saaty & Vargas, 2012):

- Estructuración de la Complejidad. Se buscó una manera para resolver el problema de la complejidad, utilizando la estructuración jerárquica de los problemas en sub-problemas homogéneos. De hecho, el uso de la

descomposición jerárquica es una de las grandes virtudes del método, puesto que el objetivo se descompone en factores más simples, es decir, un problema se descompone en sub-problemas, los cuales están relacionados directamente con el problema inicial. Consiguiendo la solución de los sub-problemas y manteniendo la relación existente entre ellos, se consigue la solución del problema inicial.

- Medición en escalas. El AHP permite realizar mediciones de factores tanto subjetivos como objetivos a partir de estimaciones numéricas, verbales o gráficas, lo cual le provee de una gran flexibilidad, permitiendo esto su aplicación en una gran variedad de campos tan distintos unos de otros. El hecho de tener definida una escala general, aplicable a cualquier situación, permite la universalidad del método y lo hace sencillo de aplicar a los tomadores de decisión. Además, la escala es clara y provee una gran amplitud para las comparaciones. En la tabla 5 se presenta la escala propuesta por Saaty (Saaty, 2012). Esta escala ha sido ampliamente validada por su eficacia a través de comparaciones teóricas con un gran número de otras escalas (Saaty, 2013).
- Síntesis. A pesar de que en el nombre se incluye la palabra Analítico, el enfoque del AHP es totalmente sistemático, ya que aunque analiza las decisiones a partir de la descomposición jerárquica, en ningún momento pierde de vista el objetivo general y las interdependencias existentes entre los conjuntos de factores, criterios y alternativas, por lo tanto, este método está enfocado en el sistema en general, y la solución que presenta es para la totalidad, no para la particularidad.

Como se ha indicado, el AHP utiliza comparaciones entre pares de elementos, construyendo matrices a partir de estas comparaciones, y usando elementos del álgebra matricial para establecer prioridades entre los elementos de un nivel, con respecto a un elemento del nivel inmediatamente superior. Cuando las prioridades de los elementos en cada nivel se tienen definidas, se agregan para obtener las prioridades globales frente al objetivo principal. Los resultados frente a las alternativas se convierten entonces en un importante elemento de soporte para quien debe tomar la decisión.

Tabla 5.- Escala fundamental propuesta por Saaty para comparaciones por pares (Saaty, 2012).

Intensidad de la Importancia	Definición	Explicación
1	Igual Importancia	Las dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo
3	Moderada Importancia	La experiencia y los juicios favorecen levemente una actividad sobre otra
5	Fuerte Importancia	La experiencia y los juicios favorecen fuertemente una actividad sobre otra
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida sobre la otra. Su dominio es demostrado en la práctica
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra es absoluta y totalmente clara
2,4,6,8	Valores intermedios para interpolar entre los valores de escala	En ocasiones en los juicios se hace necesario el disponer valores interpolables
Recíproco distinto de cero	Si se asigna a_{ij} al comparar la actividad i con la j , entonces se asigna $a_{ij} = 1/a_{ij}$ al comparar la j con la i .	Una comparación que surge de la elección del elemento más pequeño como unidad, para estimar el mayor como múltiplo de esa unidad

Gracias a esta técnica, las comparaciones pueden transformarse en valores numéricos aunque respondan a cuestiones intangibles. Esta capacidad de convertir datos empíricos en valores numéricos distingue la técnica AHP de otras técnicas de comparación de variables.

Es habitual el utilizar únicamente los valores impares de la tabla con el objeto de que exista una diferencia razonable entre las dos opciones planteadas. Los

números pares se reservan para llegar a consenso entre los evaluadores consultados, cuando sea necesario llegar a una negociación entre dos posturas muy cercanas (Saaty, 1980).

En la técnica de decisión multicriterio AHP se pueden encontrar diversos aspectos positivos, bien desde un punto de vista teórico o bien desde la práctica, tales como los que se relacionan a continuación (García-Cascales, 2009):

- Teoría: El AHP es una de las pocas técnicas multicriterio que ofrece una axiomática teórica.
- Práctica: El AHP es una de las técnicas multicriterio que mejor comportamiento práctico tiene.
- Unidad: El AHP proporciona un modelo único fácilmente comprensible, flexible, para una amplia gama de problemas estructurados.
- Complejidad: El AHP integra enfoques deductivos y de sistemas para resolver problemas complejos.
- Estructura jerárquica: El AHP refleja la tendencia natural de la mente a clasificar elementos de un sistema en diferentes niveles y a agrupar elementos similares en cada nivel.
- Medida: El AHP proporciona una escala para medir imponderables y un método para esclarecer prioridades.
- Síntesis: El AHP conduce a una estimación completa de la conveniencia de cada alternativa.
- Compensaciones: El AHP toma en consideración las prioridades relativas de los factores en un sistema y permite seleccionar la mejor alternativa en virtud de objetivos.
- Juicio y consenso: El AHP no insiste en el consenso, pero sintetiza un resultado representativo de diversos juicios.
- Repetición del proceso: El AHP permite que la gente afine su definición de un problema y mejore su juicio y comprensión mediante la repetición del proceso.

3.2.3. El establecimiento del modelo jerárquico

En la primera etapa del modelo se construye una jerarquía básica. Una jerarquía en el AHJ es una forma estructurada de modelar el problema en cuestión. Está conformada por un objetivo general, un grupo de opciones o alternativas para alcanzar el objetivo, y un grupo de factores o criterios que relacionan las alternativas al objetivo. Los criterios pueden ser subdivididos en sub-criterios, y así sucesivamente, en tantos niveles como el problema requiera.

La jerarquía se construye de modo tal que los elementos de un mismo nivel sean del mismo orden de magnitud y puedan relacionarse con algunos o todos los elementos del siguiente nivel.

Las jerarquías pueden ser visualizadas en un diagrama como el que se muestra en la ilustración 54, con el objetivo en el nivel superior, las opciones de decisión o alternativas en el nivel inferior, y los criterios, y en su caso sub-criterios, en la mitad. El nivel inferior de alternativas, más que conformar la estructura jerárquica constituye las distintas respuestas posibles al problema o las posibilidades diferentes de satisfacer en algún grado el objetivo general.

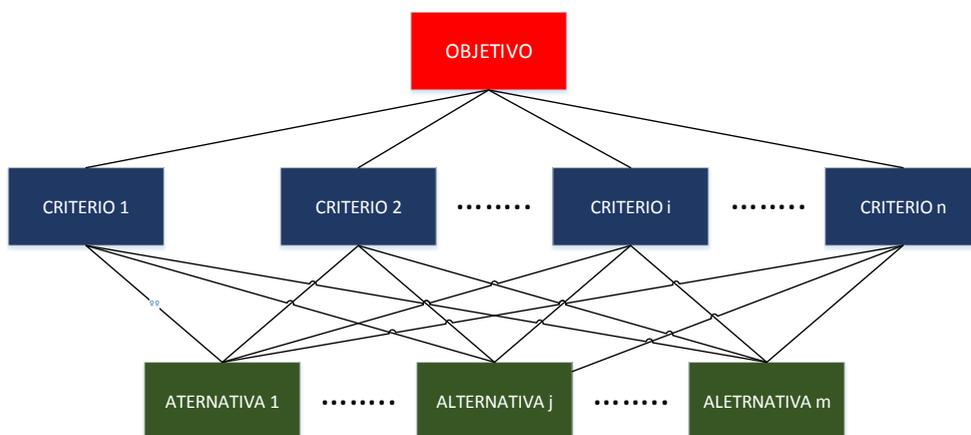


Ilustración 54.- Diagrama tipo de jerarquías.

Su construcción es la parte más creativa del proceso y requiere de un consenso entre todas las partes implicadas en el proceso de decisión. Esto es particularmente válido en el caso de Proyectos Complejos abordados por equipos multidisciplinares.

Este sistema de niveles estratificados es también una abstracción de la estructura de un sistema que posibilita estudiar las interacciones funcionales de sus componentes y sus impactos sobre el sistema entero (Saaty, 1980).

Al construir la jerarquía se debe considerar el ambiente que afecta el problema e identificar los aspectos o atributos que describen a la solución, los factores asociados con el problema, las posibles alternativas de solución y todo aquel factor relevante que intervenga en el problema (Bustillos H., 2006).

Una vez construida la estructura jerárquica del problema se da paso a la segunda etapa del proceso del AHP: la valoración de los elementos. El decisor debe emitir sus juicios de valor o preferencias en cada uno de los niveles jerárquicos establecidos, primeramente los criterios y a continuación las alternativas.

3.2.4. La comparación por pares de los criterios

Tras haberse definido los criterios, se realiza el análisis de comparación por pares, es decir, se comparan cada uno de los criterios con el resto de manera biunívoca, evaluando cuanto más importante o preferido es uno con respecto al otro. Estas comparaciones se basan tanto en factores cuantitativos como cualitativos.

El objeto de la evaluación es emitir juicios concernientes a la importancia relativa de cada uno de los criterios para crear escalas de ponderación de su influencia”.

Para organizar esta comparación entre pares, se crea una matriz de comparación (matriz A) cuya diagonal estará compuesta por valores igual a 1, ya que, en virtud de la escala definida por Saaty, incluida en la tabla 5, la comparación de un criterio evaluado consigo mismo no puede sino responder a la opción “Las dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo”, esto es, son igualmente preferidos.

A continuación se procede a la comparación de los criterios dos a dos, asignando un valor de importancia o preferencia de uno sobre el otro, según la escala de Saaty, de tal forma que al comparar el criterio i con el criterio j y adoptar un

determinado valor, se situará el mismo como elemento a_{ij} de la matriz, determinando el valor recíproco de la siguiente manera:

$$a_{ji} = 1 / a_{ij}.$$

Tabla 6.- Esquema general de la matriz de comparación por pares de los criterios.

	Criterio 1	Criterio 2	...	Criterio i	...	Criterio n
Criterio 1	1	a_{12}	...	a_{1i}	...	a_{1n}
Criterio 2	$1 / a_{12}$	1	...	a_{2i}	...	a_{2n}
⋮
Criterio i	$1 / a_{1i}$	$1 / a_{2i}$...	1	...	a_{in}
⋮
Criterio n	$1 / a_{1n}$	$1 / a_{2n}$...	$1 / a_{in}$...	1

El objeto de la evaluación es emitir juicios concernientes a la importancia relativa de los elementos de este nivel de la jerarquía para crear escalas de prioridad de influencia.

El resultado de estas comparaciones es una matriz cuadrada, recíproca y positiva, denominada "Matriz de comparaciones por pares", de forma que cada uno de sus componentes refleje la intensidad de preferencia o importancia de un elemento frente a otro respecto del objetivo considerado.

Realizada la comparación de los factores en la matriz y asignados los juicios de valor entre pares de criterios, el paso siguiente consiste en la obtención del vector de prioridades ω , que es el vector propio de la matriz A, y está referido al peso ω_j de cada uno de los criterios considerados.

Para encontrar este vector propio, se resuelve el siguiente sistema lineal:

$$A \cdot \omega = \lambda \cdot \omega \quad \det [A - \lambda \cdot I] = 0$$

siendo λ el autovector de la matriz A.

El procedimiento utilizado para obtener este vector propio consiste en los siguientes pasos:

1.- Normalizar la matriz A, dividiendo cada elemento de la matriz por el sumatorio de su columna correspondiente:

$$an_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$$

obteniendo así la matriz normalizada $A_N = [an_{ij}]$.

2.- Obtención del vector de prioridades $\omega = [\omega_i]$:

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^n an_{ij}}{n}$$

Este vector de prioridades determina un cierto valor porcentual para cada uno de los criterios, por lo que su suma es igual a 1. Dicho valor se entiende como la importancia o preferencia que dan los expertos a cada uno de los criterios en comparación con el resto.

Además, y con objeto de tener una mayor aproximación de este vector de prioridades se aplica el Método de las Potencias, esto es, tras haber obtenido el valor de dicho vector de prioridades para la matriz [A], se calcula el mismo para matriz $[A]^2$, posteriormente para la matriz $[A]^4$, $[A]^8$, y así sucesivamente hasta que las diferencias entre los valores sucesivos de ω_i puedan considerarse insignificantes.

A partir de aquí entra en juego una de las mayores ventajas del método AHP frente a otros modelos MCDM, que es la posibilidad de medir la consistencia de los juicios emitidos.

La mente humana adolece de falta de precisión en sus decisiones, siendo los juicios emitidos subjetivos por naturaleza. La participación de expertos y de sus opiniones, por tanto, puede verse afectada por el sesgo, la mala interpretación y

una auto-percepción que en general podría dar lugar a incoherencias en la toma de decisiones (Cantó-Perelló, et al., 2013).

La comparación de datos numéricos proporciona una herramienta que permite la aproximación a un juicio más objetivo. Por lo tanto, la mayor parte de las matrices de juicios que se obtienen siempre tienen cierto grado de inconsistencia.

La metodología AHP de Saaty permite la evaluación de la consistencia de la matriz de comparación por pares mediante la obtención de un índice denominado ratio o razón de consistencia (CR). Se establece un máximo de CR en función del orden de la matriz (n), que no debe superarse con el fin de garantizar el procedimiento. Saaty propone los siguientes valores límite para CR en función del orden de la matriz (Saaty, 2012).

Tabla 7.- Valor máximo de CR admisible (MCR).

n	3	4	≥ 5
MCR	5%	9%	10%

El ratio de consistencia se determina por la relación entre el índice de consistencia (CI) y el índice de consistencia aleatoria (RCI) determinado de forma experimental por Saaty en la tabla 7 y que depende igualmente del orden de la matriz (n) (Saaty, 2012).

Tabla 8.- índice de consistencia aleatorio (RCI).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RCI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Por tanto, para evaluar la consistencia de las respuestas de los expertos se procedería de la siguiente forma:

1. Se obtiene el producto de la matriz [A] de comparación por pares y el vector de prioridades ω .

$$[b_i] = [a_{ij}] \cdot [\omega_j]$$

2. Se calculan los valores inversos de b_i .

$$[c_i] = [1 / b_i]$$

3. Se determina el promedio de los valores c_i . A este valor promedio se le denomina autovalor máximo de la matriz de comparación por pares λ_{\max} .

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{n}$$

4. A continuación se obtiene el índice de consistencia CI mediante la siguiente expresión.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

5. Finalmente se determina el ratio o razón de consistencia CR.

$$CR = \frac{CI}{RCI}$$

Para comprobar si CR es adecuada, Saaty sugiere que si esa relación es superior a 0,10, para la orden de la matriz (n) superior a cuatro, las opiniones de los expertos pueden ser demasiado inconsistentes como para ser dignas de confianza, y por lo tanto esos juicios son subjetivos y deben ser revisados.

3.2.5. La comparación por pares de las alternativas

La siguiente fase consiste en la comparación por pares de las alternativas. En ella los expertos indican su preferencia mediante la comparación dos a dos, de la mejor alternativa posible, basándose únicamente en cada uno de los criterios de manera individual.

El procedimiento operacional y matemático es exactamente igual que el determinado en el apartado anterior, pero aplicado tantas veces como criterios definidos.

Por lo tanto, finalmente se habrán obtenido n vectores de prioridades de las alternativas, que determinan numéricamente las preferencias de los expertos con respecto a estas alternativas, teniendo en consideración cada uno de los criterios de forma independiente.

Cada uno de estos vectores propios de las alternativas estará formado por m elementos, siendo m el número de alternativas.

A partir de estos autovectores resultantes de la comparación por pares de las alternativas con respecto a cada uno de los criterios se conforma una matriz denominada matriz de vectores prioritarios de las alternativas o matriz de decisión [D].

Esta matriz de vectores prioritarios de las alternativas está compuesta por m filas, tantas como alternativas, y n columnas, tantas como criterios. De esta forma el elemento d_{ij} es indicativo del grado de preferencia de la alternativa i sobre las restantes, con respecto al criterio j .

3.2.6. La evaluación de los resultados

La evaluación final de los resultados se obtiene mediante el producto de la matriz de vectores prioritarios de las alternativas [D] y el vector de prioridades de los criterios ω .

$$s_i = d_{ij} \cdot \omega_j$$

siendo los valores s_i las prioridades globales para cada una de las alternativas.

No obstante, a pesar de disponer ya de las preferencias de los expertos valoradas, se ha creído conveniente completar el análisis mediante la aplicación del método VIKOR, con objeto de definir la solución de compromiso y establecer la estabilidad de la decisión adoptada. A continuación se expone esta metodología y su procedimiento de aplicación.

3.3. El método VIKOR

3.3.1. Descripción y objetivo del método.

El método VIKOR fue introducido por Serafim Opricovic (Opricovic, 1998), como una técnica aplicable para implementar dentro de los métodos de decisión multicriterio MCDM (Multiple Criteria Decision Making). para la optimización de sistemas discretos complejos con criterios conflictivos e inconmensurables (Opricovic & Tzeng, 2004).

La denominación VIKOR proviene de sus siglas en serbio *ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*, que se traduce como Optimización Multicriterio y Solución de Compromiso (Opricovic, 1990).

El objetivo de esta metodología es determinar una solución de compromiso y establecer la estabilidad de la decisión adoptada (Fouladgar, et al., 2011) (Antucheviciene, et al., 2012). Para ello el método determina una lista-ranking de compromiso, la solución de compromiso y los intervalos de estabilidad de la preferencia de la solución obtenida, todo ello de acuerdo con el valor de tres cantidades escalares (S_i , R_i , y Q_i) (Caterino, et al., 2009). Esto es, el método se centra en la ordenación y selección de un conjunto de alternativas en presencia de criterios en conflicto introduciendo un índice de ordenación multicriterio basado en la medida particular de la proximidad que cada una de las alternativas propuestas tiene con respecto a la solución ideal (García-Cascales, 2009).

Por tanto, en el procedimiento VIKOR se determina una solución de compromiso que proporciona un consenso máximo de la mayoría y un rechazo mínimo individual del oponente, utilizando la normalización lineal para eliminar las unidades de las funciones de criterio (Kaoser, et al., 2014).

El método VIKOR es una herramienta efectiva en el Análisis de Decisión Multicriterio, particularmente en situaciones donde el decisor no está capacitado, o no sabe cómo expresar su preferencia (Wei & Lin, 2008)

3.3.2. Etapas del procedimiento.

El procedimiento de aplicación de esta metodología parte de la matriz de decisión [D], siendo los datos de entrada los elementos d_{ij} de la misma.

El procedimiento implica las siguientes etapas:

Etapla 1: Para cada criterio se determinan el mejor (d_j^*) y el peor (d_j^-) de los valores de preferencia de las alternativas (d_{ij}) de la siguiente forma:

$$d_j^* = \max (d_{ij}, j = 1, \dots, m)$$

$$d_j^- = \min (d_{ij}, j = 1, \dots, m)$$

si el criterio i es del tipo de beneficio, o bien

$$d_j^* = \min (d_{ij}, j = 1, \dots, m)$$

$$d_j^- = \max (d_{ij}, j = 1, \dots, m)$$

si el criterio i es del tipo de coste.

Etapla 2: Se realizan los cálculos de los valores S_j y R_j , para $j = 1, 2, \dots, m$, mediante las siguientes expresiones:

$$S_i = \sum_{j=1}^n \frac{\omega_j (d_j^* - d_{ij})}{d_j^* - d_j^-}; \quad R_i = \max_j \left[\frac{\omega_j (d_j^* - d_{ij})}{d_j^* - d_j^-} \right]$$

donde ω_j son los valores del vector de prioridades de los criterios.

Etapla 3: Se procede al cálculo de los valores Q_j , para $j = 1, 2, \dots, m$, mediante la siguiente expresión:

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*}$$

donde los valores S^* , S^- , R^* , y R^- hacen referencia a los máximos y mínimos:

$$S^* = \min_i S_i; \quad S^- = \max_i S_i$$

$$R^* = \min_i R_i; \quad R^- = \max_i R_i$$

y el parámetro v muestra el peso de la estrategia de máxima utilidad de criterios o valor de mayor utilidad del grupo. Este parámetro es fijado por el tomador de

decisiones dentro del intervalo $[0, 1]$ dando un peso diferente de importancia para cada sumando en la expresión Q_i . En la práctica, si se asume $u > 0,5$, se da más importancia al primer término y por lo tanto se prioriza el máximo consenso. El uso de un valor $u < 0,5$ significaría que se da mayor importancia al segundo término, lo que se relaciona con la búsqueda de un menor rechazo de las alternativas con respecto a cada criterio individual. En nuestro caso, como los dos aspectos se consideran igualmente relevantes se adoptaré el valor $u = 0,5$

Etapa 4: A continuación se clasifican las alternativas, ordenadas por los valores S , R y Q en orden ascendente, siendo más importante la de valor más pequeño, lo que viene a significar su mayor aproximación a la solución ideal. De esta forma resultan tres listas de clasificación.

Etapa 5: Se propone la alternativa mejor clasificada en la lista Q (la de menor valor) como la solución de compromiso, siempre y cuando se cumplan las siguientes dos condiciones (Opricovic & Tzeng, 2002):

- Ventaja Aceptable: cuando $QD(2) - QD(1) \geq \Delta Q$; siendo $QD(1)$ y $QD(2)$ las alternativas con la primera y segunda posición respectivamente en la lista de clasificación de los valores de Q ; y $\Delta Q = 1 / (J - 1)$, donde J es el número de alternativas evaluadas.
- Estabilidad aceptable: La solución de compromiso es estable si, además de estar ubicada en primer lugar en la lista de clasificación Q , también es la mejor clasificada en las lista S o R , o en ambas. De esta manera se determina que esta solución de compromiso es estable dentro del proceso de toma de decisiones, bien por mayoría (cuando $u > 0,5$), por consenso ($u \approx 0,5$), o bien por veto ($u < 0,5$).

Cuando no se cumple alguna de estas condiciones, se propone un conjunto de soluciones de compromiso:

- Las alternativas $D(1)$ y $D(2)$ si sólo la segunda condición no se cumple;
- Las alternativas $D(1)$, $D(2)$, ..., $D(k)$ si la primera condición no se cumple; $D(k)$ se obtiene por la relación $QD(k) - QD(1) \approx \Delta Q$, lo que indicaría que las posiciones de estas alternativas están próximas.

La mejor alternativa se determinaría, por tanto, mediante una solución de compromiso que proporcionaría una utilidad máxima para la mayoría, con el valor mínimo de S , el cual representa el consenso, y un mínimo de desaprobación de la oponente, mediante la medida de R que representa el desacuerdo o rechazo. La metodología define los intervalos de estabilidad del peso para la solución de compromiso con los datos de entrada a partir de los datos facilitados por los expertos.

CAPÍTULO 4:

APLICACIÓN PRÁCTICA

CAPÍTULO 4: APLICACIÓN PRÁCTICA.

4.1. Fase preliminar: La definición del árbol jerárquico.

4.1.1. Formulación del problema y selección de expertos.

La selección de una tecnología adecuada para la desinfección de las aguas residuales tratadas siempre se asocia con diferentes características multiobjetivo (Zeng, et al., 2007). La primera fase del proceso de Delphi-AHP ha sido la formulación del problema, y la exploración de los tratamientos de desinfección y de los criterios objeto de discusión entre los expertos.

Al comienzo de cada proyecto, existen muchos factores de los cuales no se dispone de información alguna, por lo que en estas primeras etapas el juicio de los expertos es especialmente útil (Curiel-Esparza & Canto-Perello, 2013).

Para esta aplicación práctica de la metodología propuesta, los expertos fueron seleccionados entre ingenieros especializados en el tratamiento de aguas residuales, particularmente directores de proyectos con amplia experiencia en el diseño, construcción, control y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales. Todos los expertos poseen una carrera dilatada aplicada al tratamiento de aguas residuales.

Inicialmente, fueron consultados 15 expertos de entre empresas de consultoría, empresas de construcción, empresas de control y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales, así como otros expertos entre las administraciones públicas y las universidades. Finalmente, tres de ellos fueron descartados debido a su escasa colaboración y/o a la inconsistencia de sus respuestas.

Se debe indicar que algunos de los expertos participantes eran de países de habla no hispana. Es por ello que en gran parte del proceso se utilizó el idioma inglés para las comunicaciones con todos ellos, y muy particularmente en los cuestionarios emitidos.

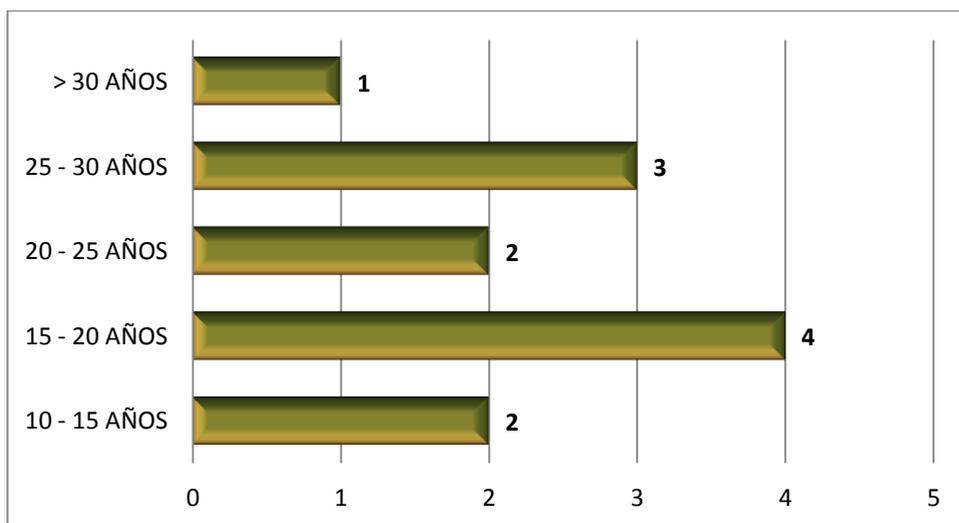


Ilustración 55. Años de experiencia laboral de los expertos.

A continuación se incluye un gráfico indicativo de la procedencia laboral de los expertos.

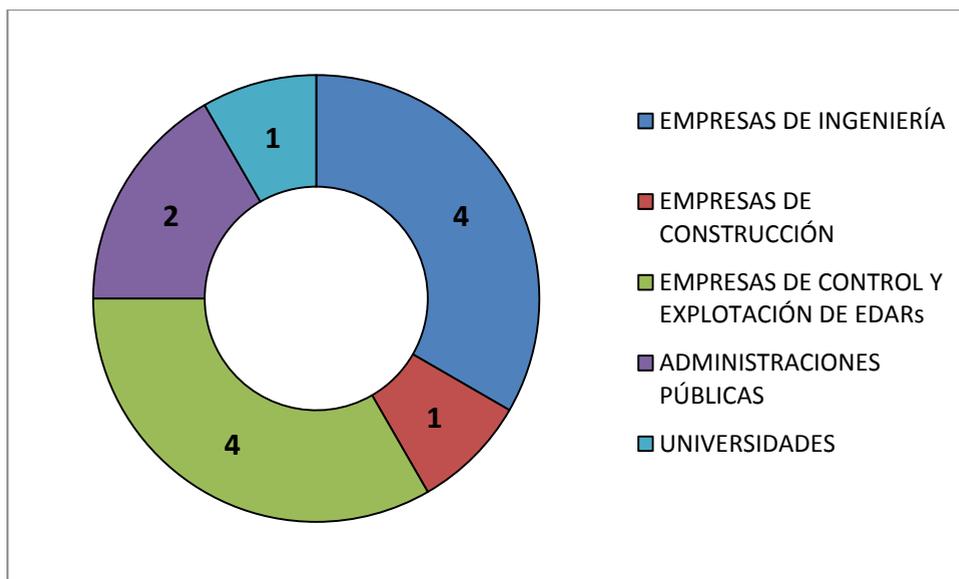


Ilustración 56.- Procedencia laboral de los expertos consultados.

4.1.2. Elaboración y envío de cuestionarios.

El proceso de elaboración de los cuestionarios y la recolección de datos duraron tres meses, mientras que el procesamiento de ellos y obtener resultados sólo un mes.

Los costos asociados con la metodología propuesta son escasos dado que se derivan tan sólo de la labor realizada por los ingenieros del proyecto.

Como ya se ha indicado los cuestionarios fueron elaborados en inglés, y el medio para el envío y posterior recepción de los mismos fue el correo electrónico. Para todos los cuestionarios se utilizó el mismo panel de expertos, conservando en todo momento el anonimato de los participantes.

4.1.3. Definición del árbol jerárquico.

En primer lugar se envió un cuestionario con una pregunta abierta en la que cada experto debía proponer criterios para la valoración y tecnologías que considerasen pertinentes para el objetivo pretendido.

Las preguntas de este primer cuestionario fueron las siguientes:

1. Con objeto de seleccionar una tecnología óptima de desinfección de aguas residuales tratadas para su posterior reutilización, ¿qué criterios considera que se deberían tener en cuenta para la valoración de la misma?
2. Con objeto de seleccionar una tecnología óptima de desinfección de aguas residuales tratadas para su posterior reutilización, ¿qué alternativas tecnológicas tomaría en consideración?

El siguiente paso fue para retroalimentar la información compilada y pedirles que reconsideren sus propuestas, en base a las aportadas por el resto de los expertos, para avanzar hacia un consenso.

Los criterios y tecnologías que el grupo de expertos consideró como de baja importancia fueron retirados.

En referencia a las alternativas de desinfección propuestas, se unificaron las tecnologías por grandes grupos, entendiendo que, dado que se trata de un estudio general, una excesiva especificación de técnicas modificadas y/o

complementadas, derivadas de otra más general, haría inviable la realización del estudio por lo numerosas de las mismas.

Finalmente, la estructura de la jerarquía del modelo que fue adoptada se muestra esquemáticamente en la ilustración 57. El primer nivel explica el objetivo general del problema de decisión, es decir, la selección de una tecnología de desinfección óptima para la reutilización de aguas residuales tratadas, el segundo nivel muestra los criterios subordinados a partir de los cuales se selecciona el tratamiento de desinfección y el tercer nivel incluye las tecnologías de desinfección que van a ser priorizadas.

Tanto los criterios como las tecnologías propuestas pueden ser adaptables o modificables dependiendo de las condiciones locales de la zona en la que se ubicare el estudio.

Las nomenclaturas adoptadas provienen de la definición en inglés de las mismas y se explican posteriormente.

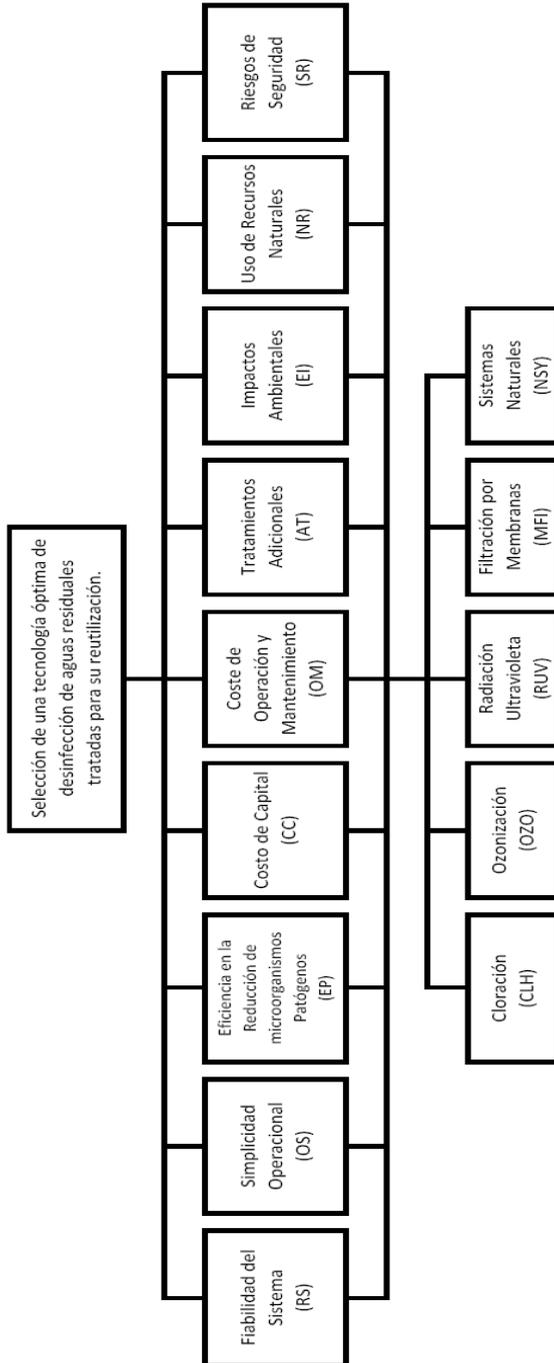


Ilustración 57.- Estructura jerárquica del modelo.

Como puede observarse, los criterios considerados principalmente consisten en prestaciones técnicas, el beneficio económico y criterios de sostenibilidad (Udias, et al., 2010). A continuación se explican los significados de los criterios adoptados finalmente para la evaluación de las alternativas:

- **Fiabilidad del Sistema** (*Reliability of the System - RS*): La tecnología seleccionada debe ser fiable, es decir, el sistema debe tener un rendimiento adecuado, en determinadas condiciones y por un período de tiempo suficiente (Von Sperling & Oliveira, 2007). Este criterio considera los siguientes aspectos de la fiabilidad: la variabilidad de la eficacia del tratamiento en operación normal y de emergencia, la probabilidad de fallos mecánicos, los impactos de los fallos sobre la calidad del efluente, la forma en que el proceso responde a los cambios de cargas en el influente, y los requisitos mínimos de calidad exigibles en el agua de entrada para un rendimiento óptimo de la tecnología.
- **Simplicidad Operacional** (*Operational Simplicity - OS*): La elección debe tener en cuenta las necesidades de operaciones especiales en el sistema y su mantenimiento. Si el funcionamiento del sistema requiere de trabajadores cualificados, puede ser rechazado por los tomadores de decisiones, en particular si se ubica en una zona remota. Simplicidad operativa y bajos requerimientos de mantenimiento deben ser objetivos a evaluar, ya que la sencillez podría determinar el éxito de funcionamiento del sistema a largo plazo.
- **Eficiencia en la Reducción de microorganismos Patógenos** (*Efficiency in reducing Pathogenic microorganisms - EP*): Las aguas residuales tratadas deben desinfectarse en la medida en que la calidad final del agua ha de cumplir con la norma reguladora vigente para una reutilización específica. Este criterio evalúa no sólo la capacidad de eliminar patógenos, sino también la capacidad de eliminar paralelamente otros contaminantes indeseables (Karimi, et al., 2010).
- El **Costo de Capital** (*Capital Cost - CC*) es otro aspecto importante a tener en cuenta en los criterios económicos, y habitualmente influye en gran medida en la selección de una tecnología en particular (Pophali, et al., 2011). Este criterio incluye, por un lado, los costos de construcción de obras y la adquisición e instalación de equipos electromecánicos

necesarios para implementar el sistema completo y por otro incluye el coste de adquisición de los espacios necesarios para dar cabida a las instalaciones.

- El **Coste de Operación y Mantenimiento** (*Operation and Maintenance cost - OM*) puede ser tan importante, o incluso más, que los costes de construcción (Avramenko, et al., 2010). El criterio incluye todos los costos asociados a los diferentes procesos de operación y mantenimiento de cada alternativa tecnológica, así como los costes de posibles reparaciones, coste de personal, los costes de energía y productos químicos entre otros.
- Los **Tratamientos Adicionales** (*Additional treatments - AT*): Algunas tecnologías de desinfección necesitan, previa o posteriormente, de tratamientos adicionales, bien sea en el propio agua a tratar como en los posibles residuos generados. La cloración, la destrucción de la capa de ozono residual o el rechazo en tratamientos de agua en sistemas de membrana, entre otros procesos, pueden ser necesarios y sus costos deben ser considerados.
- **Impactos ambientales** (*Environmental impacts - EI*): Se debe tomar en consideración el punto de vista de la población local afectada por las instalaciones. Este criterio se centra en las molestias que la instalación puede causar en el entorno: la producción de ruidos no deseados en los alrededores, el impacto estético o visual causado por la presencia de las instalaciones en el paisaje, los malos olores que pueden ser producidos por el tratamiento y otras emisiones no deseadas como gases o vapores deberían ser minimizados.
- El **Uso de Recursos Naturales** (*Use of natural resources - NR*): En este criterio se evalúa el consumo de recursos naturales de cada alternativa, principalmente relacionados con las necesidades energéticas para su funcionamiento (Bottero, et al., 2011).
- **Riesgos de Seguridad** (*Safety Risk - SR*): También se debe tener en consideración la evaluación de los riesgos tanto humanos y ambientales que una determinada tecnología puede presentar, por ejemplo, evaluando la seguridad de los trabajadores en los diferentes procesos, y/o la seguridad general en caso de fallos en las operaciones o accidentes.

Resulta significativo que los criterios adoptados finalmente por el panel de expertos podrían ser agrupados en tres conceptos generales: técnicos, económicos y ambientales.

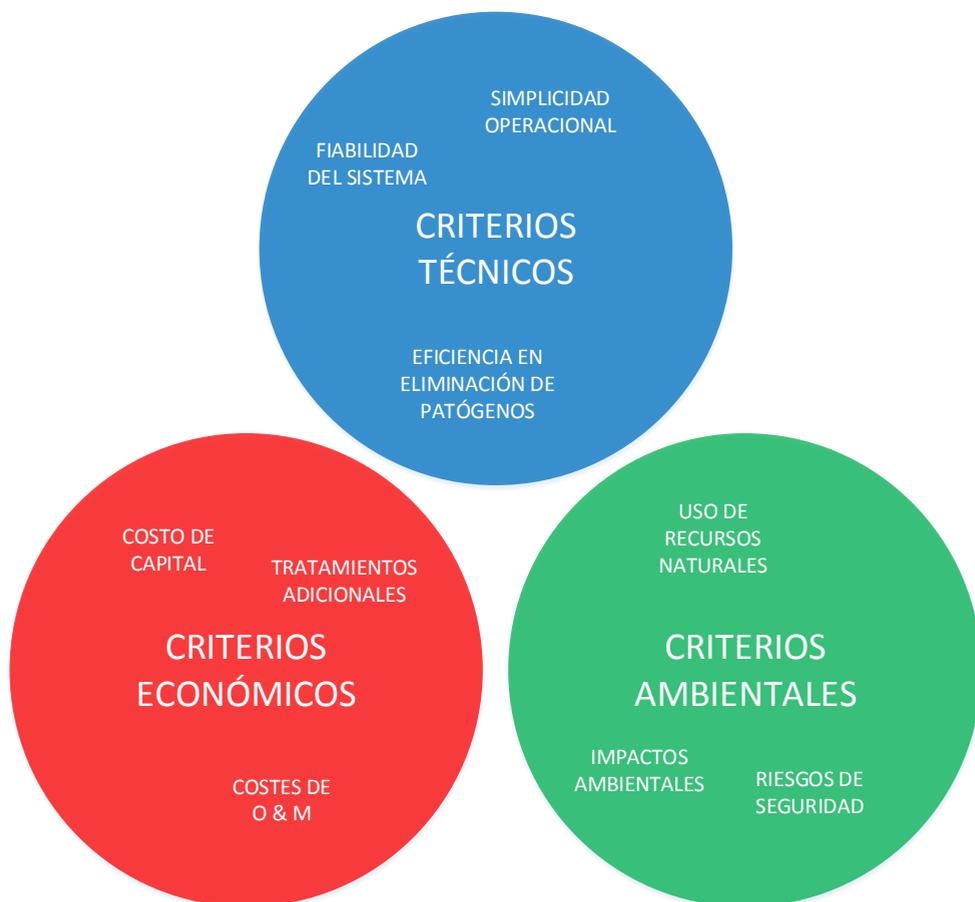


Ilustración 58.- Tipología de los criterios adoptados.

Por otra parte, las principales tecnologías de desinfección propuestas por los expertos, que fueron agrupadas y consensuadas por estos, han sido:

- La **Cloración** (*Chlorination* - **CLH**): La cloración es la adición de cloro al agua. Dicha adición puede realizarse en forma de clorogás, hipoclorito de sodio o de calcio, dióxido de cloro, etc.

- **Ozonización (Ozonation - OZO)**. El ozono es uno de los desinfectantes más potentes del mercado debido a su alta capacidad de oxidación, y es altamente adecuado para tratamientos de desinfección de agua. Su mayor ventaja es que no produce subproductos no deseados, ya que el ozono se convierte en oxígeno.
- La tecnología de **Radiación Ultravioleta (UV Radiation - UVR)** es uno de los sistemas de desinfección más aplicados en tratamientos terciarios de plantas de tratamiento de aguas residuales. Esto es debido a su capacidad para inactivar una amplia gama de patógenos sin la formación de subproductos nocivos (Chatzisyneon, et al., 2011). En la desinfección ultravioleta, el agua está expuesta a la luz ultravioleta de onda corta. Este es un germicida eficaz y no afecta a la calidad del agua. Esta es una tecnología que se aplica tanto al tratamiento del agua potable como en la desinfección de las aguas residuales tratadas.
- La **Filtración por Membranas (Membrane Filtration - MFI)** puede utilizarse en lugar del decantador para separar los sólidos del líquido. En los tratamientos de aguas residuales, la filtración por membranas se puede definir como un proceso de separación que utiliza una membrana semipermeable para dividir las aguas residuales tratadas en dos porciones: un permeado con el material que pasa a través de las membranas, y un retenido que consiste en residuos que no pasan a través de la filtro. Los principales tipos de filtración de membrana son: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa (Bick, et al., 2012).
- Los **Sistemas Naturales (Natural Systems - NSY)**. Las reacciones fotoquímicas inducidas por la luz natural son conocidas desde hace tiempo. Los estanques de maduración, y más recientemente los humedales construidos, se muestran como sistemas naturales a tener en cuenta en la desinfección de aguas residuales tratadas para su reutilización en muchos casos especiales.

4.1.4. Esquema del procedimiento de la Fase Preliminar.

El esquema del procedimiento seguido para el desarrollo de esta Fase Preliminar puede verse en la siguiente figura:

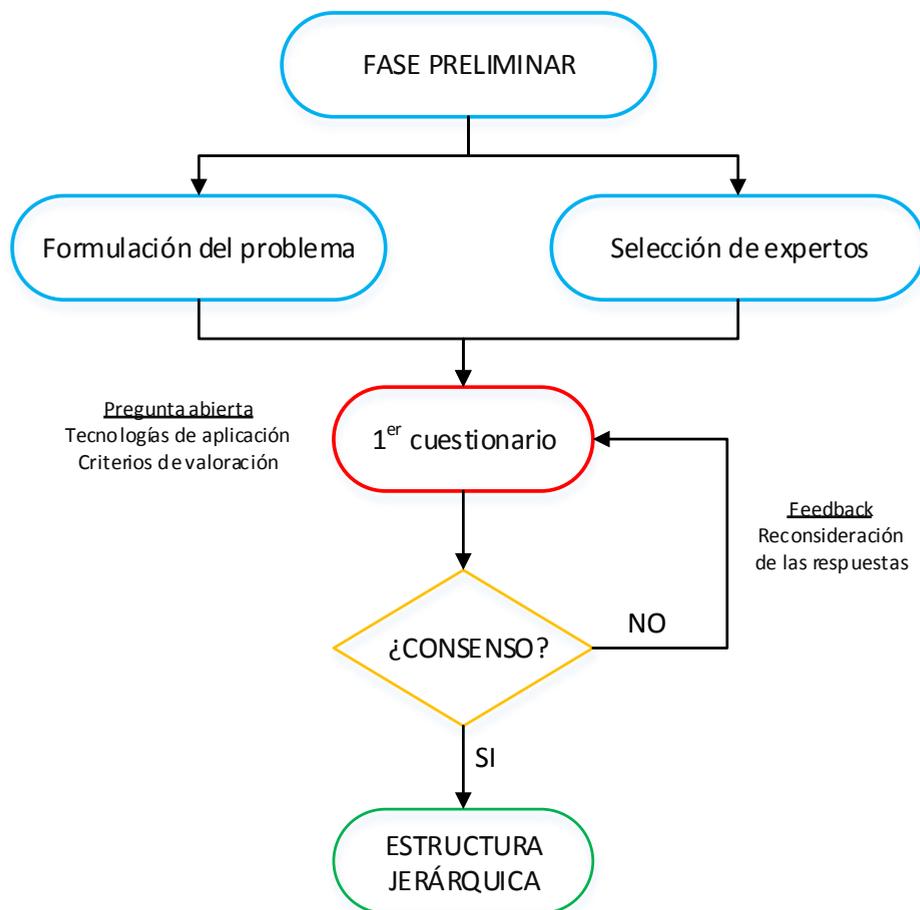


Ilustración 59.- Esquema del procedimiento de la Fase Preliminar

4.2. Fase 1: La evaluación de criterios y alternativas.

4.2.1. La comparación por pares de los criterios

Una vez obtenida la estructura jerárquica el siguiente paso del procedimiento es la evaluación de los criterios formulados. Para ello se procedió a elaborar el segundo cuestionario en el que cada experto debía evaluar el grado de preferencia de cada uno de los criterios con respecto a los restantes comparándolos dos a dos.

La pregunta exacta que se formuló a cada uno de los expertos fue la siguiente:

"Para seleccionar la mejor tecnología de desinfección de las aguas residuales tratadas para su reutilización, indique cual considera que es el grado de importancia del criterio A con respecto al criterio B, utilizando la siguiente escala (ver tabla 5.- Escala fundamental propuesta por Saaty para comparaciones por pares)"

El modelo de cuestionario remitido, que cada experto debía cumplimentar y devolver para su evaluación, puede verse en la tabla 9.

En la tabla 10 se recogen los resultados de la evaluación de cada experto de los principales criterios en relación con el objetivo general.

Como veremos posteriormente, la matriz de comparación por pares de los criterios se construye utilizando el valor medio de las respuestas de los expertos obtenido de la tabla 10. Previamente, con objeto de validar estos resultados, se realizó el análisis de la consistencia de las respuestas ($CR \leq 0,10$), tanto para los valores medios como para los resultados de las respuestas de cada experto de forma individual. Como se puede observar en dichos valores de CR, las respuestas de todos y cada uno de los expertos fueron bastante consistentes.

Tabla 9.- Segundo cuestionario: Evaluación de los criterios.

GENERAL CRITERIA				
CRITERION A	More important	Equally	Less important	CRITERION B
RS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	OS
RS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	EP
RS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	CC
RS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	OM
RS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	AT
RS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	EI
RS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	NR
RS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	SR
OS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	EP
OS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	CC
OS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	OM
OS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	AT
OS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	EI
OS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	NR
OS	9 7 5 3	1	3 5 7 9	SR
EP	9 7 5 3	1	3 5 7 9	CC
EP	9 7 5 3	1	3 5 7 9	OM
EP	9 7 5 3	1	3 5 7 9	AT
EP	9 7 5 3	1	3 5 7 9	EI
EP	9 7 5 3	1	3 5 7 9	NR
EP	9 7 5 3	1	3 5 7 9	SR
CC	9 7 5 3	1	3 5 7 9	OM
CC	9 7 5 3	1	3 5 7 9	AT
CC	9 7 5 3	1	3 5 7 9	EI
CC	9 7 5 3	1	3 5 7 9	NR
CC	9 7 5 3	1	3 5 7 9	SR
OM	9 7 5 3	1	3 5 7 9	AT
OM	9 7 5 3	1	3 5 7 9	EI
OM	9 7 5 3	1	3 5 7 9	NR
OM	9 7 5 3	1	3 5 7 9	SR
AT	9 7 5 3	1	3 5 7 9	EI
AT	9 7 5 3	1	3 5 7 9	NR
AT	9 7 5 3	1	3 5 7 9	SR
EI	9 7 5 3	1	3 5 7 9	NR
EI	9 7 5 3	1	3 5 7 9	SR
NR	9 7 5 3	1	3 5 7 9	SR

Tabla 10.- Resultados de la evaluación de los criterios.

Par de criterios	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Valor medio
RS vs OS	7	9	3	7	7	3	7	9	3	3	7	1/3	4.270
RS vs EP	9	3	3	9	9	5	9	3	5	7	7	3	5.426
RS vs CC	3	1	1/5	3	3	1/3	3	1	1/5	3	3	1/7	1.028
RS vs OM	3	5	1/7	3	3	1/5	1	7	1/3	1/3	3	1/5	1.050
RS vs AT	5	9	1/5	5	5	1/3	3	9	3	3	5	1/3	2.363
RS vs EI	5	5	3	5	5	5	5	5	5	5	7	1	4.309
RS vs NR	9	5	5	9	9	7	7	5	7	5	5	3	6.037
RS vs SR	7	7	3	5	7	5	7	7	7	5	7	5	5.831
OS vs EP	3	1/7	1	3	3	3	3	1/7	3	3	3	5	1.720
OS vs CC	1/5	1/9	1/5	1/5	1/5	1/3	1/5	1/9	1/5	1/5	1/7	1/5	0.184
OS vs OM	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/7	1/3	1/7	1/7	1/5	1/3	0.200
OS vs AT	1/3	1	1/5	1/3	1/3	1/3	1/5	1	1	1/5	1/5	1	0.405
OS vs EI	1/3	1/5	3	1/3	1/3	3	1/3	1/5	5	1/3	1/3	3	0.664
OS vs NR	3	1/5	5	3	3	5	1	1/5	3	1	1/5	5	1.442
OS vs SR	1	1/3	3	1/3	1	3	1	1/3	5	1	1/3	7	1.120
EP vs CC	1/7	1/3	1/5	1/7	1/7	1/5	1/7	1/3	1/7	1/7	1/7	1/9	0.170
EP vs OM	1/7	3	1/5	1/7	1/7	1/7	1/9	5	1/5	1/9	1/7	1/7	0.251
EP vs AT	1/5	7	1/3	1/5	1/5	1/3	1/7	7	1/3	1/7	1/5	1/5	0.389
EP vs EI	1/5	3	3	1/5	1/5	3	1/5	3	3	1/5	1/3	1/3	0.673
EP vs NR	1	3	3	3	1	5	1/3	3	5	1/3	1/5	1	1.373
EP vs SR	1/3	5	3	1/5	1/3	3	1/3	5	3	1	1/3	3	1.144
CC vs OM	1	5	1	1	1	1/3	1/3	7	3	1/3	1/3	3	1.120
CC vs AT	3	9	3	3	3	3	1	9	5	1	3	5	3.267
CC vs EI	3	5	5	3	3	5	3	5	5	3	7	7	4.275
CC vs NR	7	5	7	7	7	7	5	5	9	5	3	9	6.080
CC vs SR	5	7	5	5	5	5	5	7	9	5	5	9	5.833
OM vs AT	3	5	3	3	1	5	3	3	5	3	3	3	3.110
OM vs EI	3	1	5	3	3	7	5	1/3	7	5	5	5	3.248
OM vs NR	7	1	5	5	5	9	7	1/3	9	9	3	7	4.213
OM vs SR	5	3	5	5	3	7	7	3	9	7	5	9	5.279
AT vs EI	1	1/5	3	3	1	3	3	1/5	5	3	3	3	1.660
AT vs NR	5	1/5	3	5	5	5	5	1/5	5	5	3	5	2.685
AT vs SR	3	1/3	3	1/3	3	3	5	1/3	5	3	3	7	2.024
EI vs NR	5	1	1	5	5	3	3	1	3	3	1/3	3	2.157
EI vs SR	3	3	1	1/3	3	1	3	3	3	1/3	3	5	1.807
NR vs SR	1/3	3	1	1/5	1/3	1/3	1	3	1	1/5	5	3	0.874
CR	0.03	0.06	0.08	0.09	0.04	0.08	0.03	0.10	0.10	0.08	0.09	0.05	0.008

Continuando con el procedimiento desarrollado en el apartado 3.2.4 obtenemos la matriz de comparación por pares de los criterios y la normalizamos. Los resultados de estas matrices pueden verse en las tablas 11 y 12.

Tabla 11.- Matriz de comparación por pares de los criterios (A).

	RS	OS	EP	CC	OM	AT	EI	NR	SR
RS	1.000	4.270	5.426	1.028	1.050	2.363	4.309	6.037	5.831
OS	0.234	1.000	1.720	0.184	0.200	0.405	0.664	1.442	1.120
EP	0.184	0.581	1.000	0.170	0.251	0.389	0.673	1.373	1.144
CC	0.973	5.435	5.868	1.000	1.120	3.267	4.275	6.080	5.833
OM	0.973	4.995	3.982	0.893	1.000	3.110	3.248	4.213	5.279
AT	0.423	2.466	2.573	0.306	0.321	1.000	1.660	2.685	2.024
EI	0.232	1.505	1.486	0.234	0.308	0.602	1.000	2.157	1.807
NR	0.166	0.693	0.728	0.164	0.237	0.372	0.464	1.000	0.874
SR	0.172	0.893	0.874	0.171	0.189	0.494	0.553	1.144	1.000
sum	4.357	21.839	23.658	4.151	4.678	12.003	16.846	26.131	24.912

Tabla 12.- Matriz de comparación por pares de los criterios normalizada (A_N).

	RS	OS	EP	CC	OM	AT	EI	NR	SR
RS	0.230	0.196	0.229	0.248	0.225	0.197	0.256	0.231	0.234
OS	0.054	0.046	0.073	0.044	0.043	0.034	0.039	0.055	0.045
EP	0.042	0.027	0.042	0.041	0.054	0.032	0.040	0.053	0.046
CC	0.223	0.249	0.248	0.241	0.239	0.272	0.254	0.233	0.234
OM	0.223	0.229	0.168	0.215	0.214	0.259	0.193	0.161	0.212
AT	0.097	0.113	0.109	0.074	0.069	0.083	0.099	0.103	0.081
EI	0.053	0.069	0.063	0.056	0.066	0.050	0.059	0.083	0.073
NR	0.038	0.032	0.031	0.040	0.051	0.031	0.028	0.038	0.035
SR	0.039	0.041	0.037	0.041	0.040	0.041	0.033	0.044	0.040

El paso siguiente consiste en la obtención del vector de prioridades ω , que es el vector propio de la matriz A, y está referido al peso ω_j de cada uno de los criterios considerados. Para ello y continuando con la formulación descrita en el apartado 3.2.4 tenemos:

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n}$$

Con lo que el vector de prioridades ω resulta:

Tabla 13.- Vector de prioridades (ω).

	ω
RS	0.2271
OS	0.0481
EP	0.0419
CC	0.2437
OM	0.2083
AT	0.0919
EI	0.0635
NR	0.0359
SR	0.0397

Este vector de prioridades o autovector determina la contribución de cada criterio al objetivo global. Hay autores que sostienen que no es necesario realizar el cálculo exacto de este autovector (Kostlan, 1991); sostienen que es preferible una buena aproximación ya que se simplifican mucho los cálculos. Sin embargo, en nuestro caso, dado que los medios disponibles lo permiten, se ha obtenido el valor exacto mediante el método de las potencias.

Tabla 14.- Peso relativo de los criterios.

Acrónimo	Criterio	Peso
RS	Fiabilidad del Sistema	0.2268
OS	Simplicidad Operacional	0.0478
EP	Eficiencia en reducción de Patógenos	0.0415
CC	Costo de Capital	0.2442
OM	Coste de Operación y Mantenimiento	0.2092
AT	Tratamientos Adicionales	0.0919
EI	Impactos Ambientales	0.0632
NR	Uso de Recursos Naturales	0.0357
SR	Riesgos de Seguridad	0.0396

Por último, aplicando la metodología AHP de Saaty, se procedió a la evaluación de la consistencia de la matriz de comparación por pares de los criterios (A), mediante la obtención del índice de consistencia (CR).

Autovalor máximo:	λ_{\max}	=	9.0942
Orden de la Matriz:	n	=	9
Índice de consistencia aleatorio:	RCI	=	1.45
Índice de Consistencia:	CI	=	0.0118
Razón de Consistencia:	CR	=	0.0081
	CR (%)	=	0.81%
Máximo valor admisible de CR:			10%

Como se puede observar la consistencia de la matriz de comparación por pares de los criterios resultó más que aceptable.

4.2.2. La comparación por pares de las alternativas.

A continuación fue elaborado un tercer cuestionario que se envió al panel de expertos para evaluar las diferentes alternativas de tecnologías de desinfección. En este último cuestionario, compuesto por nueve sub-cuestionarios, los expertos indican su preferencia mediante la comparación por pares, de la mejor alternativa desinfección de aguas residuales tratadas, basándose únicamente en cada uno de los criterios de manera individual. Para esta evaluación, se utilizó la misma escala de valores de preferencia de Saaty, de 1 hasta 9.

Para ilustrar mejor el modelo, se incluye en la Tabla 15, como ejemplo, este tercer cuestionario para la evaluación de tecnologías de desinfección con respecto al criterio de "fiabilidad del sistema".

Tabla 15.- Tercer cuestionario: Evaluación de las Alternativas.

Results of the preference of each expert disinfection system based on the criterion C1: Reliability of the system.											
ALTERNATIVE A	vs	ALTERNATIVE B	More preferably		Equally	Less preferably					
CHL	vs	OZO	9	7	5	3	1	3	5	7	9
CHL	vs	UVR	9	7	5	3	1	3	5	7	9
CHL	vs	MFI	9	7	5	3	1	3	5	7	9
CHL	vs	NSY	9	7	5	3	1	3	5	7	9
OZO	vs	UVR	9	7	5	3	1	3	5	7	9
OZO	vs	MFI	9	7	5	3	1	3	5	7	9
OZO	vs	NSY	9	7	5	3	1	3	5	7	9
UVR	vs	MFI	9	7	5	3	1	3	5	7	9
UVR	vs	NSY	9	7	5	3	1	3	5	7	9
MFI	vs	NSY	9	7	5	3	1	3	5	7	9

La pregunta exacta que se formuló a cada uno de los expertos fue la siguiente:

"Para seleccionar la mejor tecnología de desinfección de las aguas residuales tratadas para su reutilización, indique cómo es el grado de preferencia de la alternativa A con respecto a la B para cada criterio individual".

En las tablas 16-24 se recogen los resultados de las preferencias de cada experto de las alternativas de tecnologías de desinfección basándose en cada uno de los criterios de manera individual.

Tabla 16.- Resultados de las preferencias de cada experto de las tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Fiabilidad del Sistema.													
Par de Alternativas	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Valor medio
CHL vs OZO	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1	1/3	1/3	1	1/3	1	1/3	0.4807
CHL vs UVR	1/7	0.2	1/7	3	1/7	1/5	1/7	1/7	1/5	3	1/9	1/7	0.2528
CHL vs MFI	1/5	1/7	1/5	7	1/5	1/7	1/5	1/5	1/7	7	1/5	1/5	0.3325
CHL vs NSY	3	1	3	1/5	3	1	3	3	1	1/5	1/7	3	1.1263
OZO vs UVR	1/5	1/5	1/5	3	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	3	1/9	1/5	0.2991
OZO vs MFI	1/3	1/7	1/3	9	1/3	1/7	1/3	1/3	1/7	7	1/5	1/3	0.4384
OZO vs NSY	5	1	5	1/3	5	1	5	5	1	1/3	1/7	5	1.5832
UVR vs MFI	3	1/3	3	7	3	1/3	3	3	1/3	5	5	3	2.0240
UVR vs NSY	9	3	9	1/5	9	3	9	9	3	1/5	3	9	3.3088
MFI vs NSY	7	7	7	1/7	7	7	7	7	7	1/7	1/3	7	2.8393

Tabla 17.- Resultados de las preferencias de cada experto de las tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Simplicidad Operacional.													
Par de Alternativas	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Valor medio
CHL vs OZO	3	3	1	1/3	1	5	3	1	5	3	5	3	2.1567
CHL vs UVR	3	5	5	3	1/5	7	3	5	7	5	1/5	3	2.6085
CHL vs MFI	7	7	9	7	1/7	9	7	9	9	7	1/7	7	3.9791
CHL vs NSY	1/3	1/3	1/3	1/5	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1/3	0.3836
OZO vs UVR	1	3	5	3	1/5	3	1	5	3	3	1/5	1	1.5805
OZO vs MFI	5	5	7	9	1/7	5	5	7	5	5	1/7	5	3.0708
OZO vs NSY	1/5	1/3	1/5	1/3	1	1/7	1/5	1/5	1/7	1/3	1	1/5	0.2810
UVR vs MFI	5	5	5	7	1/3	3	5	5	3	5	1/3	5	3.0072
UVR vs NSY	1/7	1/5	1/7	1/5	3	1/9	1/7	1/7	1/9	1/5	3	1/7	0.2475
MFI vs NSY	1/9	1/9	1/9	1/7	7	1/7	1/9	1/9	1/7	1/9	5	1/9	0.2295

Tabla 18.- Resultados de las preferencias de cada experto de las tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Eficiencia en Reducción de Patógenos.

Par de Alternativas	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Valor medio
CHL vs OZO	1/3	1/3	1/3	1	1	1/3	1/3	1	1/3	3	1/3	1	0.5774
CHL vs UVR	1/5	1/7	1/5	1/7	1/5	1/5	1/7	1/5	1/5	1/5	1/7	1/7	0.1738
CHL vs MFI	1/9	1/5	3	1/7	3	1/9	1/5	1/5	1/9	1/3	1/5	1/7	0.2675
CHL vs NSY	3	3	5	3	5	3	3	3	3	5	3	3	3.4087
OZO vs UVR	1/3	1/5	1/3	1/7	1/5	1/3	1/5	1/5	1/3	1/7	1/5	1/7	0.2180
OZO vs MFI	1/5	1/3	5	1/7	3	1/5	1/3	1/5	1/5	1/5	1/3	1/7	0.3521
OZO vs NSY	5	5	7	3	7	5	5	3	5	3	5	3	4.4604
UVR vs MFI	1/3	3	7	1	7	1/3	3	1	1/3	3	3	1	1.5157
UVR vs NSY	7	9	9	9	9	7	9	9	7	9	9	9	8.4519
MFI vs NSY	9	7	3	9	3	9	7	9	9	7	7	9	6.8919

Tabla 19.- Resultados de las preferencias de cada experto de las tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Costo de Capital.

Par de Alternativas	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Valor medio
CHL vs OZO	1	3	7	5	3	5	1	5	7	3	5	5	3.5593
CHL vs UVR	3	1	1	3	1	3	3	3	1	1	3	1	1.7321
CHL vs MFI	7	9	9	9	9	7	7	9	7	9	7	9	8.1052
CHL vs NSY	1/3	9	9	7	9	9	1/3	7	9	9	9	7	4.8797
OZO vs UVR	3	1/3	1/7	1/3	1/3	1/5	3	1/3	1/7	1/3	1/5	1/3	0.3834
OZO vs MFI	7	7	3	5	7	3	7	5	3	7	3	5	4.8518
OZO vs NSY	1/3	7	3	3	7	5	1/3	3	5	7	5	3	2.9210
UVR vs MFI	3	9	9	7	9	7	3	7	9	9	7	9	6.8919
UVR vs NSY	1/5	9	7	5	9	9	1/5	5	7	9	9	5	3.9509
MFI vs NSY	1/5	1	3	1/3	1	1	1/5	1/3	3	1	1	1/3	0.6978

Tabla 20.- Resultados de las preferencias de cada experto de las tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Costes de Operación y Mantenimiento.

Par de Alternativas	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Valor medio
CHL vs OZO	1	1/3	3	1	1/3	3	1	1/3	3	1	1/3	3	1.0000
CHL vs UVR	3	3	1/3	3	3	1/3	3	3	1/3	3	3	1/3	1.4422
CHL vs MFI	7	5	5	7	5	5	7	5	5	7	5	5	5.5934
CHL vs NSY	1/3	1/3	1/5	1/3	1/3	1/5	1/3	1/3	1/5	1/3	1/3	1/5	0.2811
OZO vs UVR	3	5	1/5	3	5	1/5	3	5	1/5	3	5	1/5	1.4422
OZO vs MFI	7	7	3	7	7	3	7	7	3	7	7	3	5.2776
OZO vs NSY	1/3	1/3	1/7	1/3	1/3	1/7	1/3	1/3	1/7	1/3	1/3	1/7	0.2513
UVR vs MFI	3	3	7	3	3	7	3	3	7	3	3	7	3.9791
UVR vs NSY	1/5	1/7	1/3	1/5	1/7	1/3	1/5	1/7	1/3	1/5	1/7	1/3	0.2120
MFI vs NSY	1/5	1/9	1/9	1/5	1/9	1/9	1/5	1/9	1/9	1/5	1/9	1/9	0.1352

Tabla 21.- Resultados de las preferencias de cada experto de las tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Tratamientos Adicionales.

Par de Alternativas	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Valor medio
CHL vs OZO	1	1/3	1	1/3	1	1/3	1/5	1/3	1	1	1/3	1/3	0.5049
CHL vs UVR	1/3	1/5	1/9	3	1/3	1/5	3	1/5	1/9	1/3	3	1/5	0.4055
CHL vs MFI	1/9	1/7	1/9	5	1/9	1/9	1	1/7	1/9	1/9	5	1/7	0.2680
CHL vs NSY	1/5	1/5	1/5	1/3	1/5	1/5	1/7	1/5	1/5	1/5	1/3	1/5	0.2118
OZO vs UVR	1/3	1/3	1/9	5	1/3	1/3	1	1/3	1/9	1/3	5	1/3	0.4777
OZO vs MFI	1/9	1/5	1/9	7	1/9	1/7	3	1/5	1/9	1/9	7	1/5	0.3450
OZO vs NSY	1/5	1/3	1/5	1/3	1/5	1/5	1/7	1/3	1/5	1/5	1/3	1/3	0.2406
UVR vs MFI	1/5	1/3	1	3	1/5	1/5	3	1/3	1	1/5	3	1/3	0.5848
UVR vs NSY	1/3	1	5	1/7	1/3	1/3	1/7	1	5	1/3	1/7	1	0.5574
MFI vs NSY	1/3	3	5	1/9	1/3	3	1/9	3	5	1/3	1/9	3	0.8274

Tabla 22.- Resultados de las preferencias de cada experto de las tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Impactos Ambientales.

Par de Alternativas	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Valor medio
CHL vs OZO	1/3	1	1/3	1/5	1/5	1	1/3	1/5	1/5	1/3	1/5	1/3	0.3236
CHL vs UVR	1/7	1/9	1/7	1/7	1/3	1/9	1/7	1/7	1/3	1/7	1/7	1/7	0.1578
CHL vs MFI	1/5	1/5	3	1	5	1/5	3	1	5	1/5	1	3	1.0064
CHL vs NSY	1/9	1/3	1/5	1/7	1/7	1/3	1/5	1/7	1/7	1/9	1/7	1/5	0.1716
OZO vs UVR	1/5	1/9	1/5	1/3	1	1/9	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1/5	0.2694
OZO vs MFI	1/3	1/5	5	5	3	1/5	5	5	3	1/3	5	5	1.7100
OZO vs NSY	1/7	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/7	1/3	1/3	0.2894
UVR vs MFI	3	5	9	7	5	5	9	7	5	3	7	9	5.7856
UVR vs NSY	1/3	7	3	1	3	7	3	1	3	1/3	1	3	1.8202
MFI vs NSY	1/5	3	1/7	1/7	1/7	3	1/7	1/7	1/7	1/5	1/7	1/7	0.2510

Tabla 23.- Resultados de las preferencias de cada experto de las tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Uso de Recursos Naturales.

Par de Alternativas	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Valor medio
CHL vs OZO	1	1/3	1/3	1/5	1	1/3	1/3	1	1/3	1	1/3	1/3	0.4607
CHL vs UVR	3	1/5	1/7	1/5	3	1/5	1/7	3	1/5	3	1/7	1/5	0.4534
CHL vs MFI	5	3	3	7	5	3	3	3	3	5	3	3	3.6580
CHL vs NSY	1/3	1/7	1/7	1/5	1/3	1/7	1/7	1/3	1/7	1/3	1/7	1/7	0.1949
OZO vs UVR	3	1/3	1/5	1/5	3	1/3	1/5	3	1/3	3	1/5	1/3	0.5848
OZO vs MFI	5	5	7	3	5	5	7	5	5	5	7	5	5.2121
OZO vs NSY	1/3	1/5	1/5	1/5	1/3	1/5	1/5	1/3	1/5	1/3	1/5	1/5	0.2371
UVR vs MFI	3	7	9	9	3	7	9	1	7	3	9	7	5.2367
UVR vs NSY	1/5	1/3	1	1	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1/5	1	1/3	0.4055
MFI vs NSY	1/7	1/9	1/9	1/9	1/7	1/9	1/9	1/5	1/9	1/7	1/9	1/9	0.1243

Tabla 24.- Resultados de las preferencias de cada experto de las tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Riesgos de Seguridad.													
Par de Alternativas	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	Valor medio
CHL vs OZO	1/5	1/7	1	0.2	1/7	1/3	1/5	1	1/7	1/3	1/5	1/7	0.2546
CHL vs UVR	1/7	1/9	1/5	1/7	1/9	1/5	1/7	1/5	1/9	1/5	1/7	1/9	0.1470
CHL vs MFI	1/3	1	3	1/3	1	1/3	1/3	3	1	1/3	1/3	1	0.6934
CHL vs NSY	1/9	1/7	1/3	1/9	1/7	1/5	1/9	1/3	1/7	1/5	1/9	1/7	0.1600
OZO vs UVR	1/3	1/3	1/5	1/3	1/3	1/3	1/3	1/5	1/3	1/3	1/3	1/3	0.3061
OZO vs MFI	3	5	3	3	5	1	3	3	5	1	3	5	2.9618
OZO vs NSY	1/5	1	1/3	1/5	1	1/3	1/5	1/3	1	1/3	1/5	1	0.4055
UVR vs MFI	5	9	7	5	9	3	5	7	9	3	5	9	5.9080
UVR vs NSY	1/3	3	3	1/3	3	1	1/3	3	3	1	1/3	3	1.2009
MFI vs NSY	1/7	1/7	1/5	1/7	1/7	1/3	1/7	0.2	1/7	1/3	1/7	1/7	0.1740

Al igual que en la evaluación de los criterios, las medias geométricas de los valores adoptados por cada uno de los expertos fueron los valores que sirvieron para conformar las matrices de comparación por pares de las alternativas.

El siguiente paso, por tanto, fue construir las matrices de comparación por pares de las alternativas de tecnologías de desinfección. Dado que en la estructura jerárquica se determinaron nueve criterios a tener en consideración en las diferentes evaluaciones, resultarán por tanto nueve matrices de comparación por pares de las alternativas, cada una de ellas teniendo en cuenta cada uno de los criterios de forma individual.

Una vez construidas las matrices de comparación por pares, fueron calculados los vectores propios de cada una de ellas. Finalmente, también se llevó a cabo el análisis de consistencia de cada matriz.

Las Tablas 25 a 33 muestran los resultados de todas las evaluaciones técnicas de las alternativas de desinfección para cada uno de los criterios considerados de forma individual, así como los resultados del análisis de consistencia de las mismas. En las ilustraciones 60 a 68 puede verse gráficamente las preferencias de los expertos basadas exclusivamente en cada uno de los criterios de forma independiente.

Tabla 25.- Vector de prioridades y análisis de la consistencia de la matriz de comparación por pares de las alternativas de tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Fiabilidad del Sistema.

	CHL	OZO	UVR	MFI	NSY	Vector de Prioridades
CHL	1.0000	0.4807	0.2528	0.3325	1.1263	0.0911
OZO	2.0801	1.0000	0.2991	0.4384	1.5832	0.1426
UVR	3.9563	3.3437	1.0000	2.0240	3.3088	0.4087
MFI	3.0072	2.2811	0.4941	1.0000	2.8393	0.2619
NSY	0.8879	0.6316	0.3022	0.3522	1.0000	0.0956
$\lambda_{\max} =$	5.0674	CI =	0.0169	CR =	0.0150	< 0.10

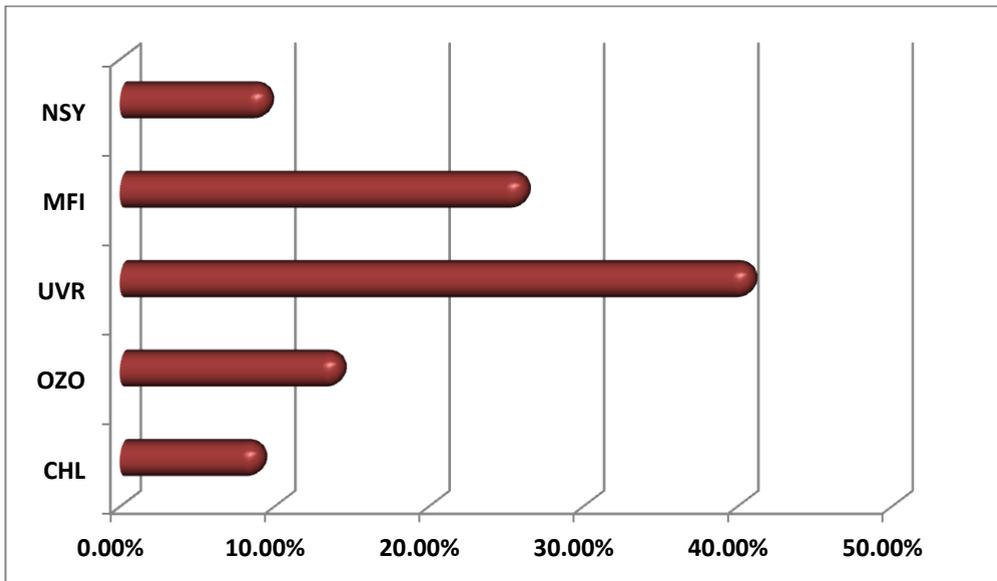


Ilustración 60.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Fiabilidad del Sistema".

Tabla 26.- Vector de prioridades y análisis de la consistencia de la matriz de comparación por pares de las alternativas de tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Simplicidad Operacional.

	CHL	OZO	UVR	MFI	NSY	Vector de Prioridades
CHL	1.0000	2.1567	2.6085	3.9791	0.3836	0.2407
OZO	0.4637	1.0000	1.5805	3.0708	0.2810	0.1449
UVR	0.3834	0.6327	1.0000	3.0072	0.2475	0.1158
MFI	0.2513	0.3256	0.3325	1.0000	0.2295	0.0605
NSY	2.6067	3.5593	4.0401	4.3576	1.0000	0.4380
$\lambda_{max} =$	5.1740	CI =	0.0435	CR =	0.0388	< 0.10

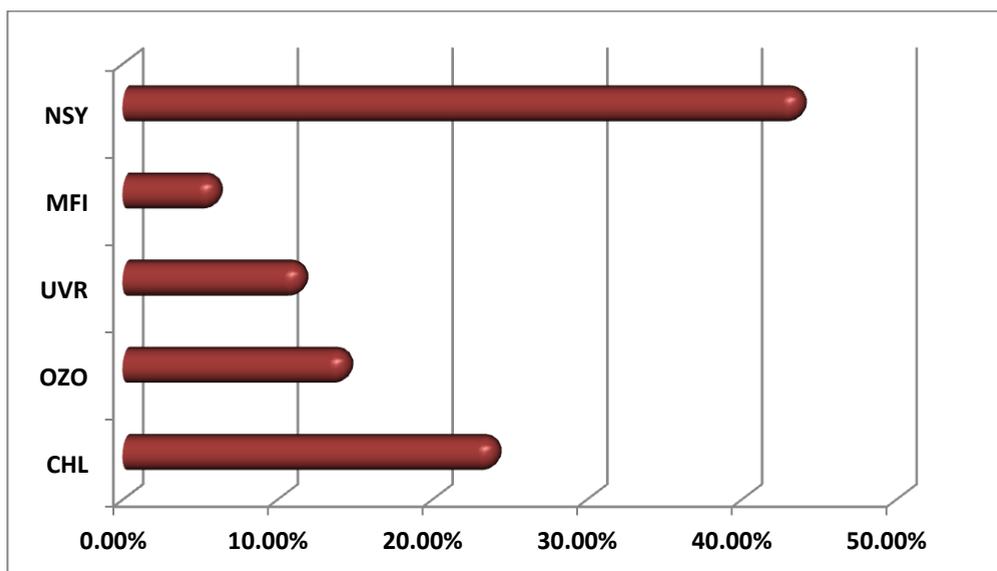


Ilustración 61.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Simplicidad Operacional".

Tabla 27.- Vector de prioridades y análisis de la consistencia de la matriz de comparación por pares de las alternativas de tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Eficiencia en la Reducción de Patógenos.

	CHL	OZO	UVR	MFI	NSY	Vector de Prioridades
CHL	1.0000	0.5774	0.1738	0.2675	3.4087	0.0890
OZO	1.7321	1.0000	0.2180	0.3521	4.4604	0.1277
UVR	5.7525	4.5873	1.0000	1.5157	8.4519	0.4457
MFI	3.7380	2.8403	0.6598	1.0000	6.8919	0.3000
NSY	0.2934	0.2242	0.1183	0.1451	1.0000	0.0376
$\lambda_{max} =$	5.1046	CI =	0.0262	CR =	0.0234	< 0.10

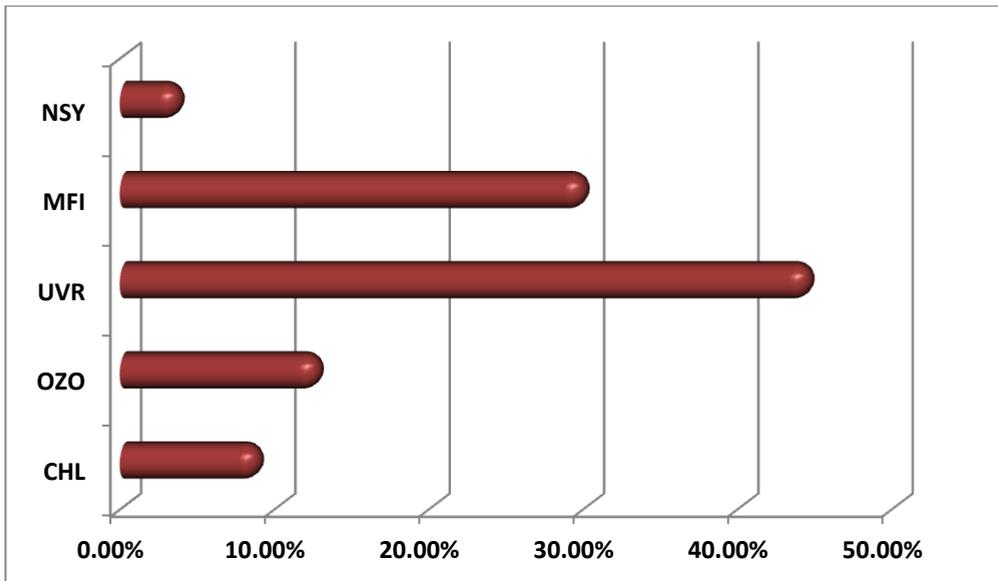


Ilustración 62.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Eficiencia en la Reducción de Patógenos".

Tabla 28.- Vector de prioridades y análisis de la consistencia de la matriz de comparación por pares de las alternativas de tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Costo de Capital.

	CHL	OZO	UVR	MFI	NSY	Vector de Prioridades
CHL	1.0000	3.5593	1.7321	8.1052	4.8797	0.4276
OZO	0.2810	1.0000	0.3834	4.8518	2.9210	0.1604
UVR	0.5774	2.6085	1.0000	6.8919	3.9509	0.2980
MFI	0.1234	0.2061	0.1451	1.0000	0.6978	0.0442
NSY	0.2049	0.3423	0.2531	1.4330	1.0000	0.0698
$\lambda_{max} =$	5.0956	CI =	0.0239	CR =	0.0213	< 0.10

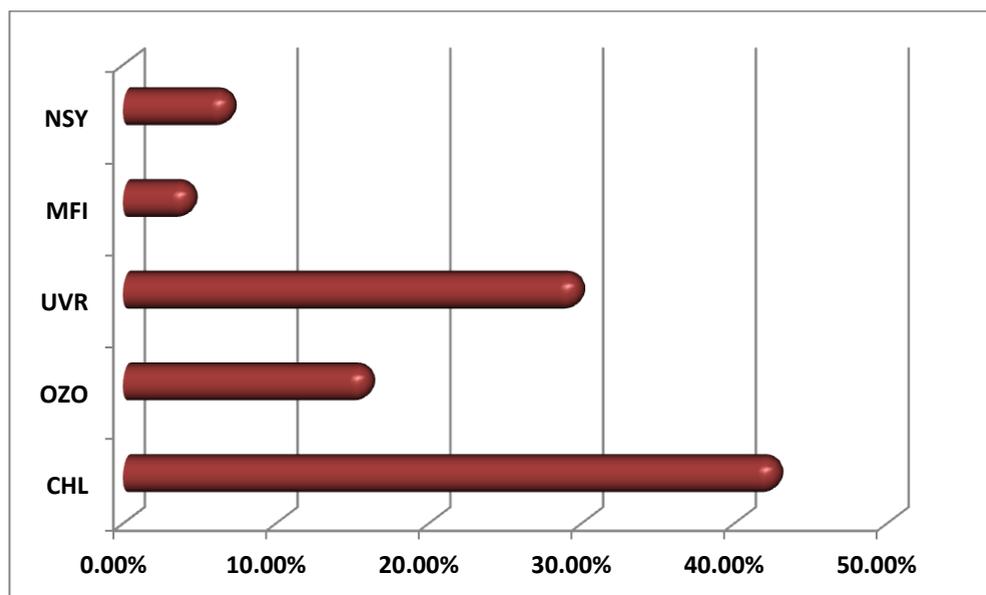


Ilustración 63.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Costo de Capital".

Tabla 29.- Vector de prioridades y análisis de la consistencia de la matriz de comparación por pares de las alternativas de tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Costes de Operación y Mantenimiento.

	CHL	OZO	UVR	MFI	NSY	Vector de Prioridades
CHL	1.0000	1.0000	1.4422	5.5934	0.2811	0.1709
OZO	1.0000	1.0000	1.4422	5.2776	0.2513	0.1650
UVR	0.6934	0.6934	1.0000	3.9791	0.2120	0.1212
MFI	0.1788	0.1895	0.2513	1.0000	0.1352	0.0397
NSY	3.5569	3.9791	4.7177	7.3986	1.0000	0.5033
$\lambda_{max} =$	5.1246	CI =	0.0311	CR =	0.0278	< 0.10

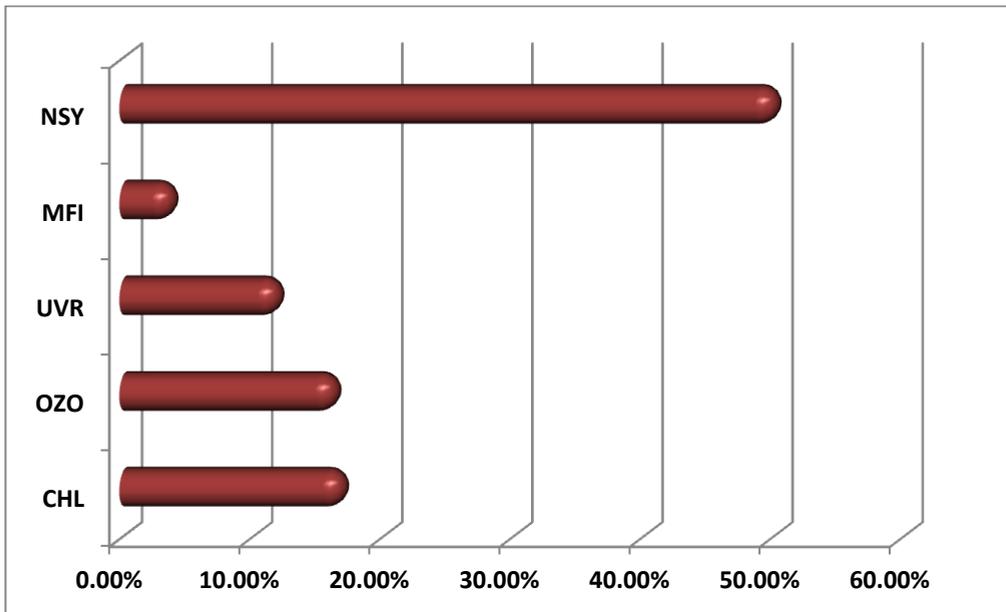


Ilustración 64.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Costes de Operación y Mantenimiento".

Tabla 30.- Vector de prioridades y análisis de la consistencia de la matriz de comparación por pares de las alternativas de tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Tratamientos Adicionales.

	CHL	OZO	UVR	MFI	NSY	Vector de Prioridades
CHL	1.0000	0.5049	0.4055	0.2680	0.2118	0.0696
OZO	1.9807	1.0000	0.4777	0.3450	0.2406	0.1022
UVR	2.4662	2.0935	1.0000	0.5848	0.5574	0.1855
MFI	3.7316	2.8984	1.7100	1.0000	0.8274	0.2886
NSY	4.7225	4.1563	1.7940	1.2087	1.0000	0.3540
$\lambda_{\max} =$	5.0360	CI =	0.0090	CR =	0.0080	< 0.10

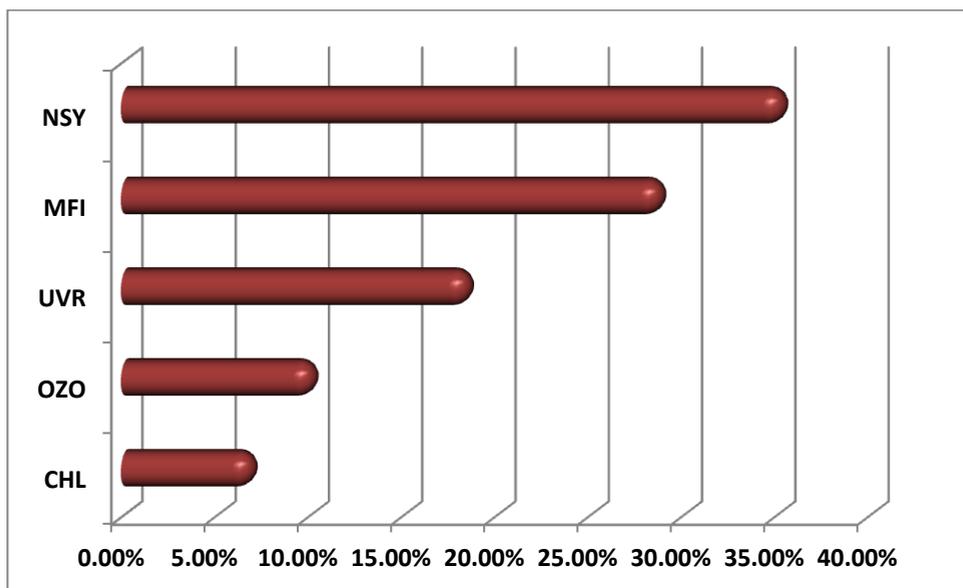


Ilustración 65.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Tratamientos Adicionales".

Tabla 31.- Vector de prioridades y análisis de la consistencia de la matriz de comparación por pares de las alternativas de tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Impactos Ambientales.

	CHL	OZO	UVR	MFI	NSY	Vector de Prioridades
CHL	1.0000	0.3236	0.1578	1.0064	0.1716	0.0580
OZO	3.0906	1.0000	0.2694	1.7100	0.2894	0.1247
UVR	6.3381	3.7116	1.0000	5.7856	1.8202	0.4372
MFI	0.9936	0.5848	0.1728	1.0000	0.2510	0.0695
NSY	5.8268	3.4550	0.5494	3.9845	1.0000	0.3105
$\lambda_{max} =$	5.0812	CI =	0.0203	CR =	0.0181	< 0.10

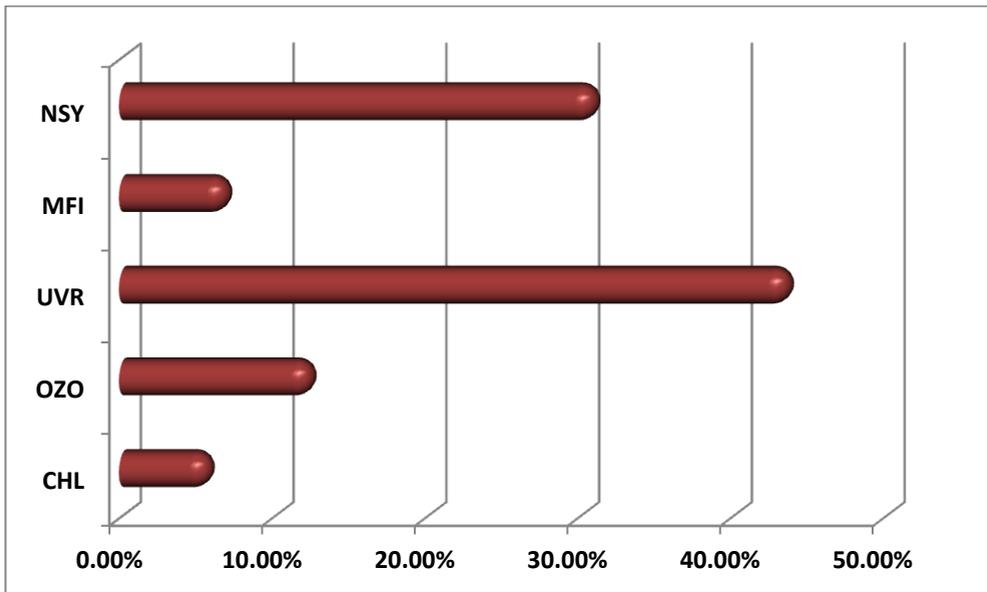


Ilustración 66.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Impactos Ambientales".

Tabla 32.- Vector de prioridades y análisis de la consistencia de la matriz de comparación por pares de las alternativas de tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Uso de Recursos Naturales.

	CHL	OZO	UVR	MFI	NSY	Vector de Prioridades
CHL	1.0000	0.4607	0.4534	3.6580	0.1949	0.1015
OZO	2.1705	1.0000	0.5848	5.2121	0.2371	0.1608
UVR	2.2053	1.7100	1.0000	5.2367	0.4055	0.2152
MFI	0.2734	0.1919	0.1910	1.0000	0.1243	0.0396
NSY	5.1317	4.2172	2.4662	8.0479	1.0000	0.4830
$\lambda_{max} =$	5.1319	CI =	0.0330	CR =	0.0295	< 0.10

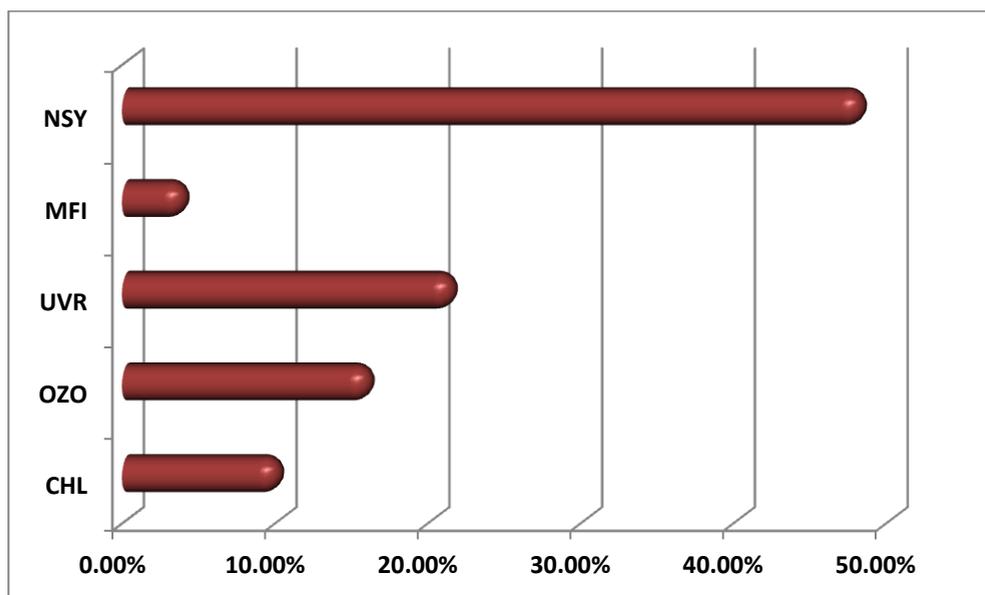


Ilustración 67.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Uso de Recursos Naturales".

Tabla 33.- Vector de prioridades y análisis de la consistencia de la matriz de comparación por pares de las alternativas de tecnologías de desinfección basándose en el criterio: Riesgos de Seguridad.

	CHL	OZO	UVR	MFI	NSY	Vector de Prioridades
CHL	1.0000	0.2546	0.1470	0.6934	0.1600	0.0486
OZO	3.9283	1.0000	0.3061	2.9618	0.4055	0.1566
UVR	6.8041	3.2666	1.0000	5.9080	1.2009	0.3948
MFI	1.4422	0.3376	0.1693	1.0000	0.1740	0.0620
NSY	6.2488	2.4662	0.8327	5.7466	1.0000	0.3380
$\lambda_{max} =$	5.0435	CI =	0.0109	CR =	0.0097	< 0.10

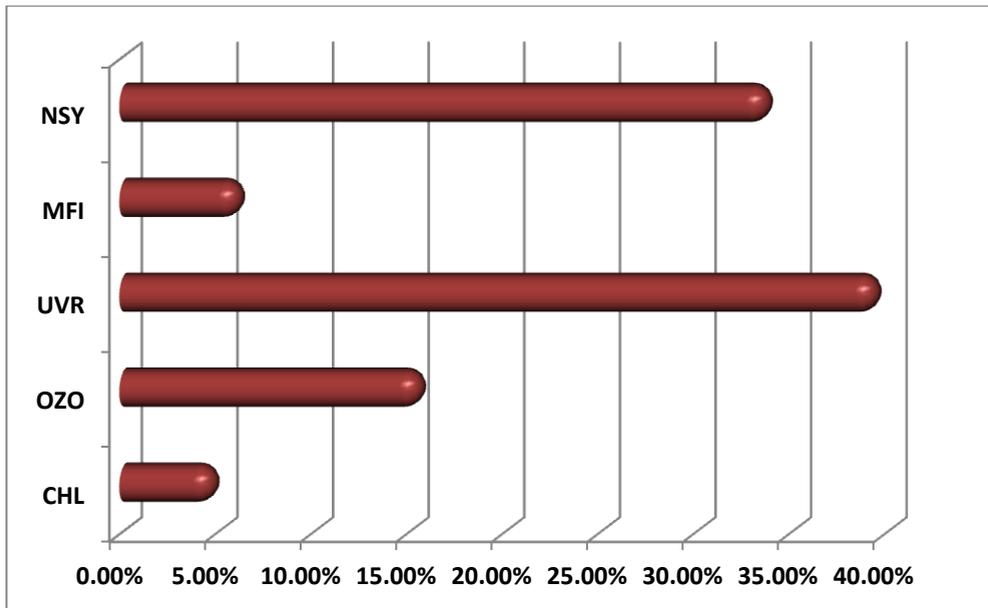


Ilustración 68.- Valoración de las alternativas de desinfección según el criterio "Riesgos de Seguridad".

En la evaluación realizada se puede observar que las respuestas de los expertos fueron bastante consistentes.

Como se ha indicado con anterioridad, a pesar de que los vectores de prioridades están calculados con una aproximación más que suficiente, las herramientas matemáticas disponibles nos capacitan para obtenerlos con mayor exactitud mediante la aplicación del método de las potencias. De esta manera se conforma la Matriz de Vectores de Prioridades de las Alternativas que se muestra a continuación en la tabla 34, obtenida a partir de los autovectores resultantes de la comparación por pares de las alternativas con respecto a cada uno de los criterios.

Tabla 34.- Matriz de Vectores Prioritarios de las Alternativas.

	RS	OS	EP	CC	OM	AT	EI	NR	SR
CHL	0.0900	0.2415	0.0869	0.4309	0.1688	0.0692	0.0569	0.0986	0.0481
OZO	0.1415	0.1429	0.1263	0.1576	0.1634	0.1018	0.1233	0.1590	0.1556
UVR	0.4115	0.1128	0.4496	0.2999	0.1195	0.1858	0.4382	0.2153	0.3968
MFI	0.2621	0.0591	0.3005	0.0432	0.0388	0.2885	0.0693	0.0386	0.0613
NSY	0.0949	0.4437	0.0367	0.0684	0.5095	0.3547	0.3123	0.4885	0.3382

4.2.3. La evaluación de los resultados.

Por último, el resultado global de prioridad se obtuvo por la multiplicación de matrices entre la matriz de vectores de prioridades de las alternativas de tecnologías de desinfección y el vector de prioridades de los criterios. El resultado del producto de esas matrices puede verse en la tabla incluida a continuación.

Tabla 35.- Resultado global de prioridades.

CHL	0.1915	19.15%
OZO	0.1458	14.58%
UVR	0.2838	28.38%
MFI	0.1281	12.81%
NSY	0.2507	25.07%

Como se puede observar los juicios de los expertos han determinado que su preferencia al respecto de las tecnologías de desinfección de aguas residuales tratadas sea la de Radiación Ultravioleta, las restantes tecnologías por orden de preferencia quedarían como sigue:

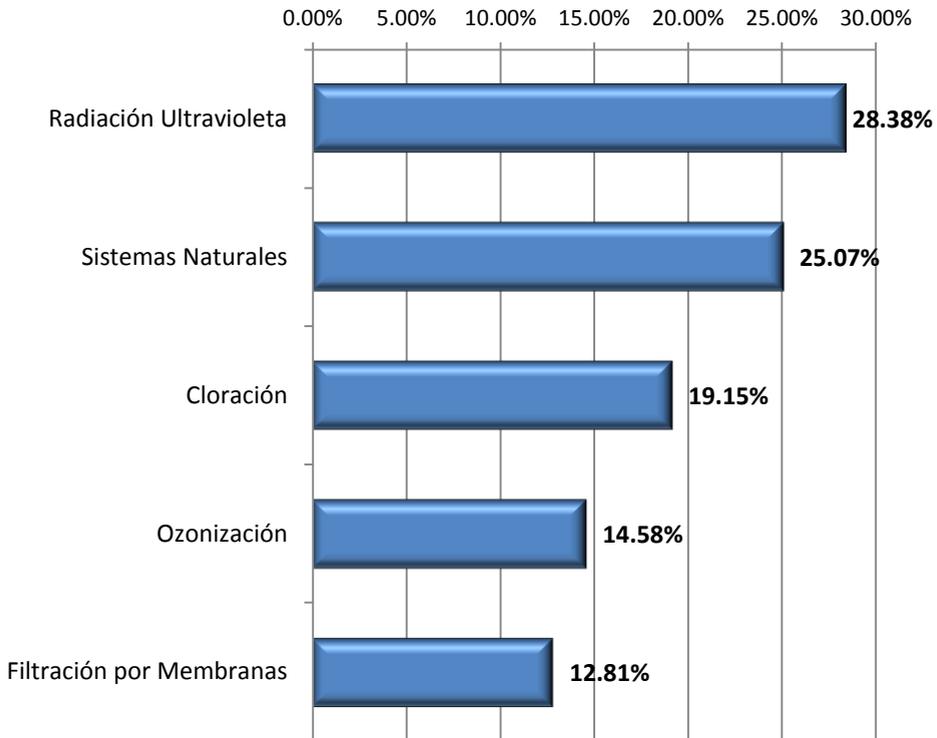


Ilustración 69.- Resultado global de prioridades de las alternativas.

4.2.4. Esquemas de los procedimientos de la Fase 1.

Los esquemas de los procedimientos seguidos para el desarrollo de esta fase 1 pueden verse en las siguientes figuras:

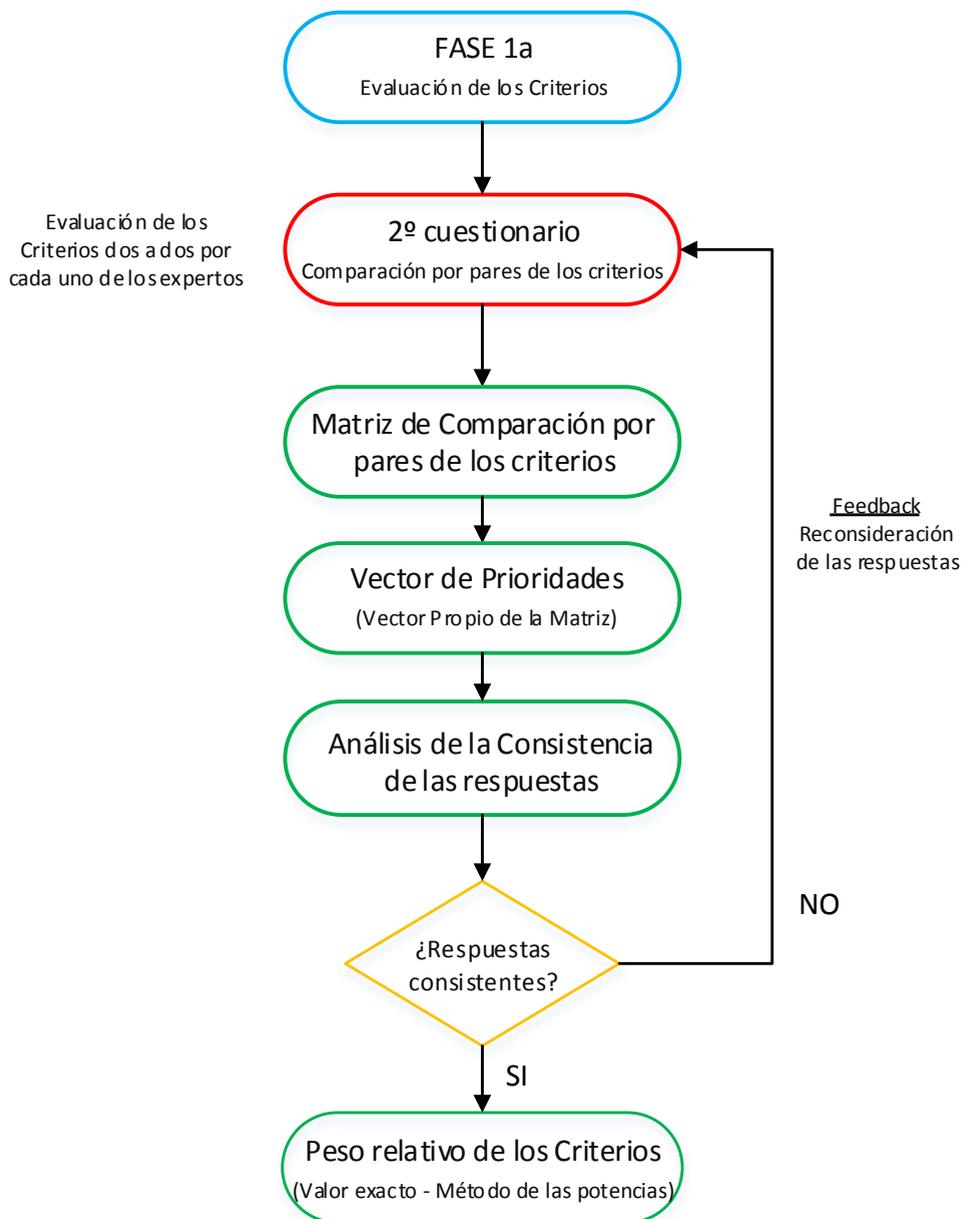


Ilustración 70.- Esquema del procedimiento de la Fase 1 (a)

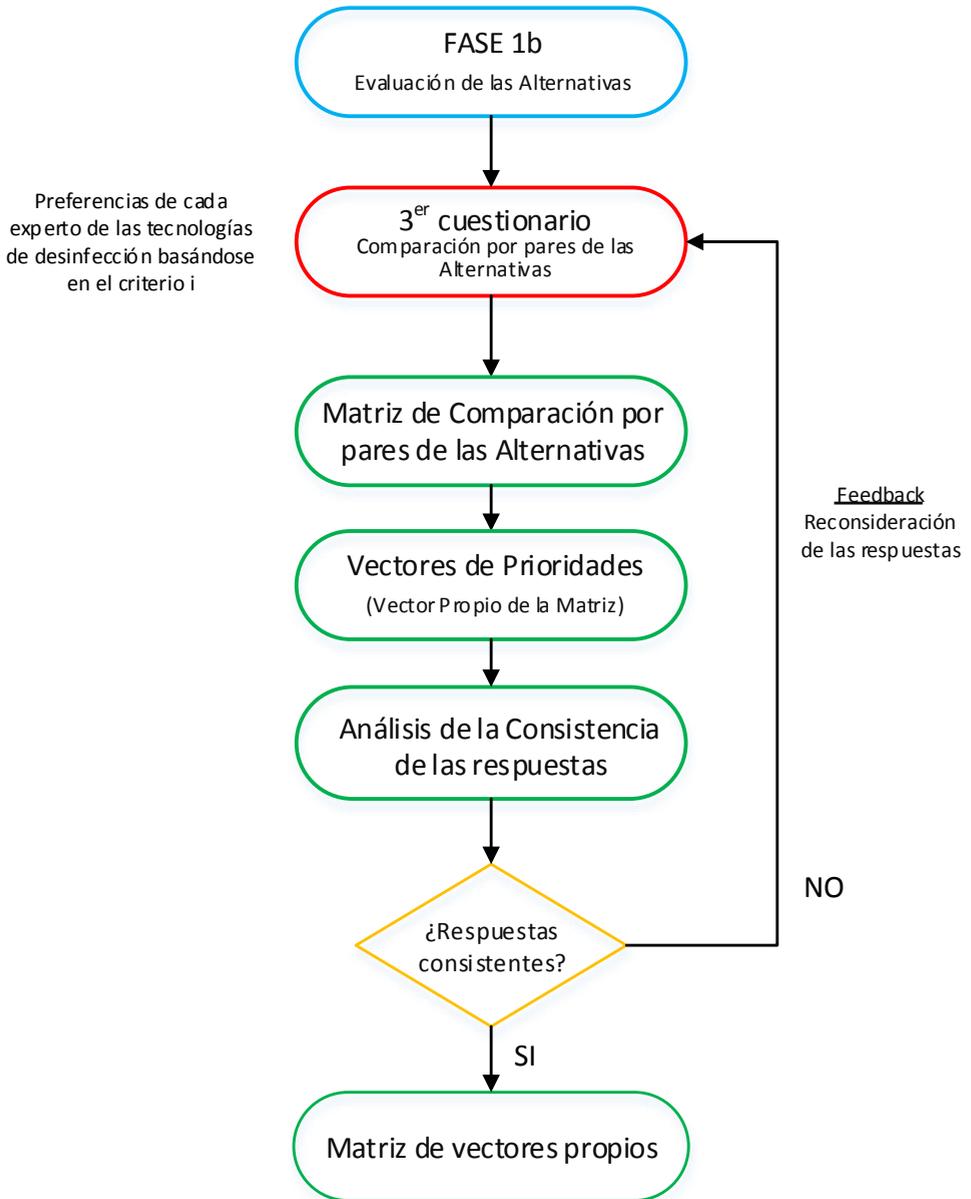


Ilustración 71.- Esquema del procedimiento de la Fase 1 (b)

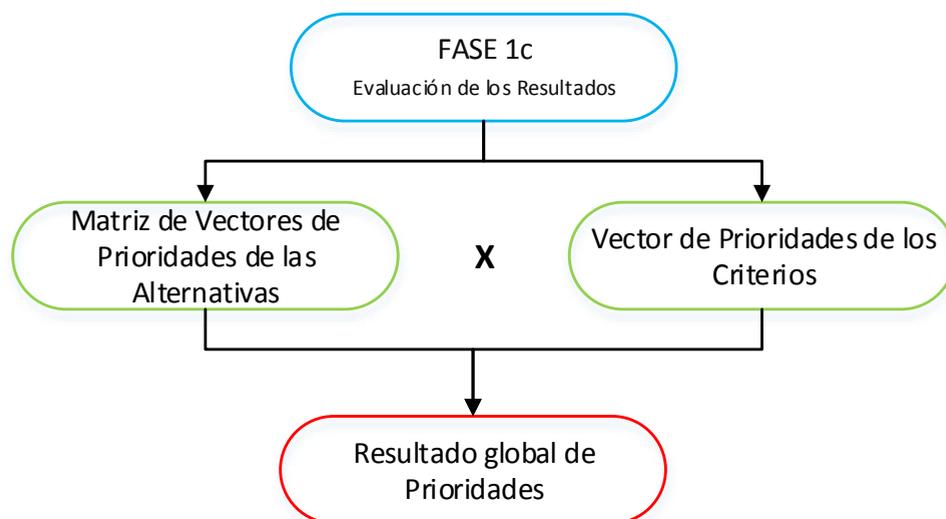


Ilustración 72.- Esquema del procedimiento de la Fase 1 (c)

4.3. Fase 2: Solución de compromiso y análisis de estabilidad.

En esta fase 2 procedemos a la aplicación del método VIKOR, con objeto de definir la solución de compromiso y establecer la estabilidad de la decisión adoptada.

Para la aplicación del método VIKOR aplicamos las etapas del procedimiento descrito en el apartado 3.3, partiendo de los datos contenidos en la Matriz de Vectores Prioritarios de las Alternativas.

Etapas 1: Para cada criterio se determinan el mejor (d_j^*) y el peor (d_j^-) de los valores de preferencia de las alternativas (d_{ij}) para todos y cada uno de los criterios., obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 36.

Tabla 36.- Resultado global de prioridades.

	d*	d-
RS	0.4115	0.0900
OS	0.4437	0.0591
EP	0.4496	0.0367
CC	0.4309	0.0432
OM	0.5095	0.0388
AT	0.3547	0.0692
EI	0.4382	0.0569
NR	0.4885	0.0386
SR	0.3968	0.0481

Etapa 2: Se realizan los cálculos de los valores S_j y R_j , obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 37.

Tabla 37.- Resultado de valores S_i y R_i .

	CHL	OZO	UVR	MFI	NSY
S_i	0.6655	0.7735	0.3730	0.7779	0.5208
R_i	0.2268	0.1905	0.1734	0.2442	0.2284

Etapa 3: Se procede al cálculo de los valores Q_j , pero para ello, previamente, se precisan dos pasos intermedios:

- Determinación de los valores S^* , S^- , R^* , y R^- que hacen referencia a los valores máximos y mínimos de S_j y R_j , respectivamente:

$$S^* = 0.3730$$

$$R^* = 0.1734$$

$$S^- = 0.7779$$

$$R^- = 0.2442$$

- Fijación del parámetro u dentro del intervalo $[0, 1]$, cuyo significado, tal y como se indicó anteriormente, muestra el peso de la estrategia de máxima utilidad de criterios o valor de mayor utilidad del grupo. En nuestro caso se ha decidido adoptar un valor de $u = 0,5$, esto es, los dos aspectos de máximo consenso y mínimo rechazo en la alternativa elegida se consideran igualmente relevantes.

De esta forma los resultados de los valores Q_j se muestran a continuación en la tabla 38,

Tabla 38.- Resultado de valores Q_j .

	CHL	OZO	UVR	MFI	NSY
Q_i	0.7386	0.6157	0.0000	1.0000	0.5706

donde el valor mínimo de Q_i determina la alternativa preferida por el panel de expertos.

Etapa 4: A continuación, tal y como se muestra en la tabla 39 se clasifican las alternativas de desinfección, ordenadas por los valores S , R y Q en orden ascendente, esto es, de mayor a menor preferencia, siendo más importante la de valor más pequeño.

Como ya se indicó, esto viene a significar el mayor grado de aproximación a la solución ideal, de tal forma que resultan tres listas de clasificación.

Tabla 39.- Ranking de preferencia de las tecnologías de desinfección.

Posición	1	2	3	4	5
S_i	UVR	NSY	CHL	OZO	MFI
R_i	UVR	OZO	CHL	NSY	MFI
Q_i	UVR	NSY	OZO	CHL	MFI

Como podemos observar, de nuevo la alternativa tecnológica de Radiación Ultravioleta resulta ser la mejor valorada.

Etap 5: No obstante, aunque aparentemente se propone la alternativa mejor clasificada en la lista Q (la de menor valor), Radiación Ultravioleta, como la solución de compromiso, se debe verificar el cumplimiento de las condiciones de Ventaja Aceptable y Estabilidad Aceptable:

- Condición de Ventaja Aceptable:

$$Q(NSY) - Q(UVR) = 0.5706 > 1/(5 - 1) = 0.25$$

La condición de Ventaja Aceptable "Sí" se cumple.

- Condición de Estabilidad Aceptable:

La alternativa mejor clasificada en el Ranking de Q, UVR, es además la mejor clasificada en R y en S.

La condición de Estabilidad Aceptable "Sí" se cumple.

Como resumen, dado que se puede observar en los resultados de la Tabla 38 que (1) la alternativa UVR es la mejor valorada para el valor mínimo de Q_i , que además (2) la condición sobre la ventaja aceptable se satisface, y que (3) el test de estabilidad en la toma de decisiones también se satisface, ya que la mejor alternativa para Q es también la mejor situada para S y R (considerando la “regla de consenso $u \approx 0.5$ ”), se puede concluir, por tanto, y sin ningún género de dudas, que es la Radiación Ultravioleta la alternativa de tecnología de desinfección preferida por los expertos consultados.

CAPÍTULO 5:

CONCLUSIONES

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.

Esta Tesis ha presentado un sistema experto utilizando una metodología híbrida que combina el método AHP con el método Delphi y la técnica VIKOR para seleccionar una tecnología de desinfección sostenible para proyectos de reutilización de aguas residuales.

Se han considerado criterios técnicos, económicos y de sostenibilidad ambiental para evaluar idoneidad de cada una de las tecnologías de desinfección propuestas como alternativas.

Al respecto de estos criterios considerados por los expertos se debe destacar el siguiente hecho significativo:

Los resultados muestran que los principales criterios para la selección de la mejor alternativa técnica de desinfección, a juicio de los expertos, son: el costo de capital (24,42%), la fiabilidad del sistema (22,68%) y los costes de operación y mantenimiento (20,92%), tal y como se muestra en la ilustración 73. Es interesante observar el gran peso dado por el panel de expertos a los criterios de carácter económico, muy por encima de otros de carácter técnico o ambientales, lo que ha influido en gran medida en la selección de la tecnología de desinfección.

Este hecho puede deberse a que la mayoría de los expertos fueron seleccionados en el área de Valencia (España), ya que el estudio se llevó a cabo en esta ciudad. Aunque el presente trabajo tiene como objetivo ser un ejemplo general para la aplicación del procedimiento de selección propuesto, se ve influido por la experiencia de los ingenieros del panel de expertos elegidos en ese escenario específico; es decir, por una serie de características muy marcadas:

- Han adquirido la mayor parte de su experiencia profesional, en el ámbito de una región con recursos hídricos relativamente escasos,
- Poseen una amplia y dilatada experiencia en el tratamiento de aguas residuales y tecnologías de reutilización, especialmente orientadas como destino al riego agrícola y/o urbano, y
- La mayoría de los expertos ha estado operando en una economía de mercado muy competitiva, fuertemente influenciada por los costes.

Así que, probablemente, este es el escenario que los expertos a menudo se han enfrentado.

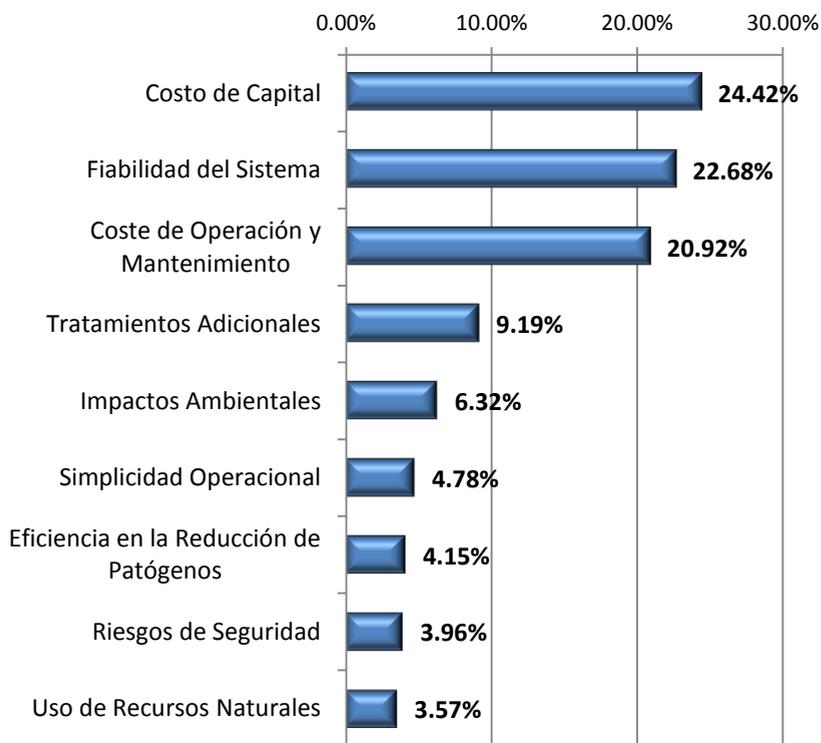


Ilustración 73.- Pesos de cada criterio con respecto al objetivo global.

Por otra parte, y redundando en lo expuesto, destaca el hecho de que todos los análisis de sensibilidad realizados sobre las respuestas de los expertos, arrojan unos valores altamente positivos. Aunque también se debe indicar que este elevado consenso también viene influenciado por la característica de retroalimentación (feedback) propia de la aplicación del método Delphi.

La ilustración 74 muestra los pesos de cada alternativa técnica para cada criterio. Las tecnologías de la radiación ultravioleta y los sistemas naturales son los mejores clasificados.

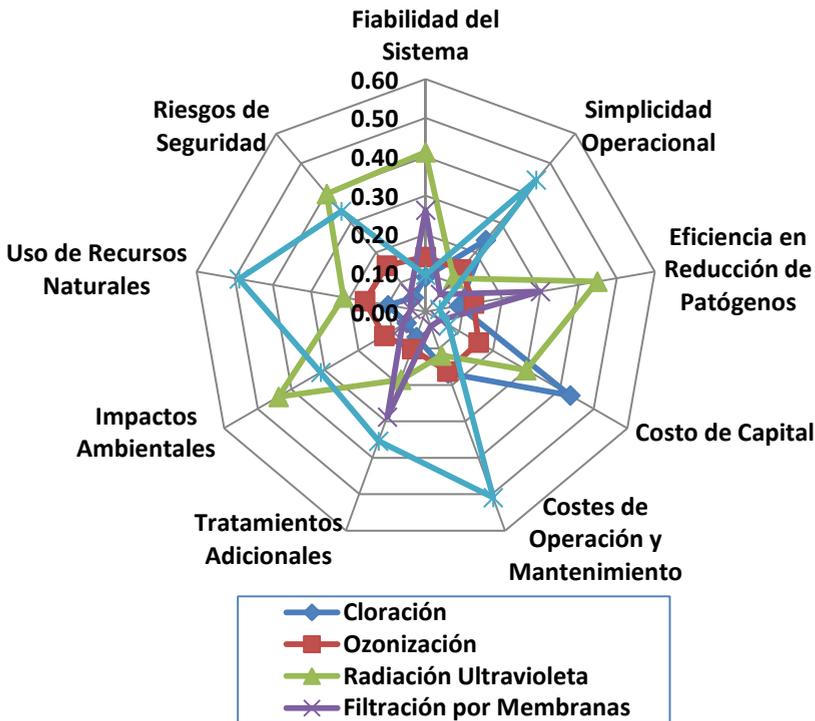


Ilustración 74.- Pesos de cada alternativa técnica para cada criterio.

Cabe señalar que la ilustración 74 no tiene en cuenta la priorización de criterios. Sin embargo, los resultados de la selección de la mejor alternativa de desinfección confirman este hecho, como se muestra en la ilustración 66, donde las prioridades globales para cada una de las alternativas técnicas, muestran que la tecnología de Radiación Ultravioleta es la preferida por los expertos (28,38%), seguida por la alternativa de Sistemas Naturales (25,07%).

Por otra parte, este resultado coincide con el hecho de que, hoy en día, la tecnología de radiación ultravioleta, en sus diferentes variantes, se muestra como una de mayor crecimiento adoptadas en la desinfección de las aguas residuales tratadas para su reutilización.

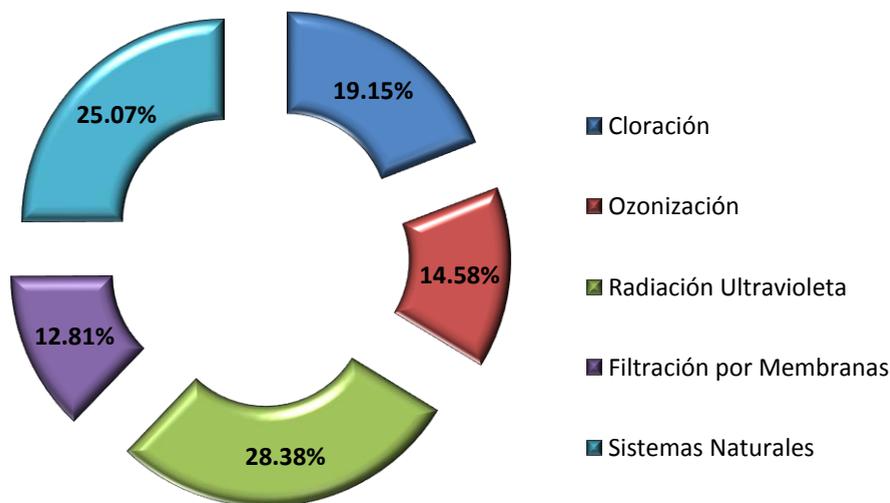


Ilustración 75.- Prioridades Globales para cada una de las alternativas de desinfección.

Por último, la aplicación de la técnica VIKOR verifica que la alternativa de Radiación Ultravioleta es, a juicio de los expertos, la mejor opción, puesto que cumple las siguientes tres condiciones:

- Es la mejor situada en el ranking de evaluación.
- Cumple la condición de tener una "*Ventaja Aceptable*" sobre la situada en segundo lugar.
- Cumple la condición de tener una "*Estabilidad Aceptable*"

Por todo lo expuesto se puede concluir que, a juicio de los expertos consultados, y en este caso particular, la elección de la tecnología de la Radiación Ultravioleta parece dar la mejor explicación general a las preocupaciones técnicas, económicas y ambientales, que derivan de la selección de un sistema de desinfección en proyectos de reutilización de las aguas residuales tratadas .

La metodología expuesta se puede adaptar a las necesidades de cada caso en particular, y tanto los criterios adoptados como la importancia dada a los mismos pueden ser diferentes en función de los juicios del panel de expertos.

Por otro lado, las alternativas adoptadas por los expertos, que en este caso han sido tecnologías de carácter general, pueden ser concretadas y/o particularizadas para un caso concreto en el que por ejemplo se determine claramente el destino final de las aguas regeneradas.

El método propuesto es objetivo y tiene carácter universal, es por ello que puede ser aplicado en cualquier otra localización, que evidentemente tendrá distintas necesidades y diferentes criterios de valoración.

Otra línea de investigación podría orientarse en el sentido de evaluar las innovaciones tecnológicas que constantemente están saliendo al mercado, y compararlas con las que históricamente más se han aplicado.

Así mismo, en el tratamiento y regeneración de aguas residuales existen otras tecnologías que se aplican en las diferentes etapas de los tratamiento que evidentemente también podrían ser susceptibles de evaluarse mediante un procedimiento similar.

En conclusión, el sistema experto Delphi-AHP-VIKOR propuesto en este trabajo se ha mostrado como un método fiable en la selección de una técnica de desinfección sostenible para proyectos de reutilización de aguas residuales, y los resultados obtenidos se puede utilizar para apoyar las decisiones de los gestores de proyectos en la selección de la tecnología de desinfección de aguas residuales tratadas más adecuada.

CAPÍTULO 6:

REFERENCIAS

CAPÍTULO 6: REFERENCIAS.

Anane, M., Bouziri, L., Limam, A. & Jellali, S., 2012. Ranking suitable sites for irrigation with reclaimed water in the Nabeul-Hammamet region (Tunisia) using GIS and AHP-multicriteria decision analysis. *Resources Conservation and Recycling*, Volume 65, pp. 36-46.

Antucheviciene, J., Zakarevicius, A. & Zavadskas, E., 2011. Measuring Congruence of Ranking Results Applying Particular MCDM Methods. *Informatica*, 22(3), pp. 319-338.

Antucheviciene, J., Zakarevicius, A. & Zavadskas, E., 2012. Ranking redevelopment decisions of derelict buildings and analysis of ranking results. *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 46(2), pp. 37-62.

Astigarriga, E., 2000. *El Método Delphi*. San Sebastian: Universidad de Deusto.

Avila, C., Garfi, M. & Garcia, J., 2013. Three-stage hybrid constructed wetland system for wastewater treatment and reuse in warm climate regions. *Ecological Engineering*, Volumen 61, pp. 43-49.

Avramenko, Y., Kamami, M. & Kraslawskia, A., 2010. *Fuzzy Performance Indicators for Decision Making in Selection of Wastewater Treatment Methods*. Ischia,(Italy), s.n., pp. 127-132.

Bick, A., Gillerman, L., Manor, Y. & Oron, G., 2012. Economic assessment of an integrated membrane system for secondary effluent polishing for unrestricted reuse. *Water*, 4(1), pp. 219-236.

Blázquez, J., 1995. La cultura del Valle del Indo: Mohenjo-Daro y Harappa. *Revista de Arqueología*, 16(172), pp. 24-33.

Bottero, M., Comino, E. & Riggio, V., 2011. Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems. *Environmental Modelling & Software*, 26(10), pp. 1211-1224.

Brysonand, N. & Mobolurin, A., 1994. An approach to using The analytic Hierarchy for solving multiple criteria decision making problems.. *European Journal of Operational Research.*, 76(3), pp. 440-454.

Burks, B. & Minnis, M., 1994. *Onsite wastewater treatment systems*. Primera Edición ed. Madison, WI: Hogarth House.

Bustillos H., J., 2006. *Aptitud de áreas para el establecimiento de plantaciones forestales en Sinaloa.* Montecillo, México.: Tesis de Maestría en Ciencias. Programa Forestal. Colegio de Postgraduados,.

Cantó-Perelló, J., Curiel-Esparza, J. & Calvo, V., 2013. Criticality and threat analysis on utility for planning security policies of utilities in urban underground space.. *Expert Systems with Applications*, Issue 40, pp. 4707-4714.

Caterino, N., Iervolino, I., Manfredi, G. & Cosenza, E., 2009. Comparative Analysis of Multi-Criteria Decision-Making Methods for Seismic Structural Retrofitting. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24(6), pp. 432-445.

Chatzisymeon, E., Droumpali, A., Mantzavinos, D. & Venieri, D., 2011. Disinfection of water and wastewater by UV-A and UV-C irradiation: application of real-time PCR method.. *Photochemical & Photobiological Sciences*, Issue 10, p. 389–395.

Curiel-Esparza, J. & Canto-Perello, J., 2012. Understanding the major drivers for implementation of municipal sustainable policies in underground space.. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, Issue 19, p. 506–514.

Curiel-Esparza, J. & Canto-Perello, J., 2013. Selecting utilities placement techniques in urban underground engineering. *Archives Of Civil And Mechanical Engineering*, 13(2), pp. 276-285.

Curiel-Esparza, J., Canto-Perello, J. & Calvo, M., 2004. Establishing sustainable strategies in urban underground engineering.. *Science and Engineering Ethics*, Issue 10, p. 523–530.

Diez González, M. T. & de la Macorra García, C., 2014. Utilización de membranas como tratamientos terciarios para regeneración de aguas residuales: Membranas Cerámicas.. *Tecnología y Desarrollo*, XII(Separata), pp. 1-25.

EPA_832-F-99-062, 1999. *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con cloro.*, Washington, D.C.: Office of Water. United States Environmental Protection Agency.

EPA_832-F-99-063, 1999. *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con ozono.*, Washington, D.C.: Office of Water. United States Environmental Protection Agency.

European_Union, 2000. *Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council Establishing a Framework for the Community Action in the Field of Water Policy.*, s.l.: Available online: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32000L0060:EN:NOT> (accessed on 17 June 2013).

Fernández Troyano, A., 2014. *Empresas Construcción. Directorio Empresarial.* [En línea]

Available at: <http://www.empresasconstruccion.es/cloro-y-ozono-desinfeccion-de-agua-potable/>

[Último acceso: 15 Marzo 2015].

Föhl, A. & Hamm, M., 1985. *Die Industriegeschichte des Wassers., Transport - Energie - Versorgung.* Düsseldorf: VDI-Verlag .

Fontana, M. & Morais, D., 2013. Using Promethee V to Select Alternatives so as to Rehabilitate Water Supply Network with Detected Leaks.. *Water Resources Management*, Issue 27, p. 4021–4037.

Fouladgar, M. y otros, 2011. Project portfolio Selection Using VIKOR Technique under Fuzzy Environment. *2nd International Conference on Construction and Project Management*, Volumen 15, pp. 236-240.

García-Cascales, M. d. S., 2009. *Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y “Soft Computing”*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena. Tesis Doctoral..

Garza-Ríos, R., 2014. *Técnicas multicriteriales para la toma de decisiones empresariales.* www.monografias.com.. [En línea] Available at: <http://www.monografias.com/trabajos14/toma-decisiones/toma-decisiones.shtml>
[Último acceso: 18 agosto 2015].

Ghaitidak, D. & Yadav, K., 2013. Characteristics and treatment of greywater-a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(5), pp. 2795-2809.

Gomez-Lopez, M., Bayo, J., Garcia-Cascales, M. & Angosto, J., 2009. Decision support in disinfection technologies for treated wastewater reuse. *Journal Of Cleaner Production*, 17(16), pp. 1504-1511.

González Gálvez, L., 2007. *Estudio comparativo de un proceso biológico convencional y un proceso mediante membranas para el tratamiento de aguas residuales urbanas*.. Cádiz: Proyecto Final de Carrera, Facultad de Ciencias de la Universidad de Cádiz.

Guo, M. y otros, 2013. Quantitative Characterization and Prediction Modeling of Photoreactivation of Coliforms After Ultraviolet Disinfection of Reclaimed Municipal Wastewater. *Water Air and Soil Pollution*, 224(11), p. 1774.

Hernández Muñoz, A., 2001. *Depuración y Desinfección de Aguas Residuales*. Quinta edición ed. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Hijosa-Valsero, M. y otros, 2010. Assessment of full-scale natural systems for the removal of PPCPs from wastewater in small communities. *Water Resource*, Volumen 44, pp. 1429-1439.

Jing, L., Chen, B., Zhang, B. & Li, P., 2013. A Hybrid Stochastic-Interval Analytic Hierarchy Process Approach for Prioritizing the Strategies of Reusing Treated Wastewater. *Mathematical Problems in Engineering*, Volumen 2013, p. 10.

Kalbar, P., Karmakar, S. & Asolekar, S., 2012. Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach. *Journal of Environmental Management*, Volumen 113, pp. 158-169.

Kaoser, M., Rashid, M. & Ahmed, S., 2014. Selecting a Material for an Electroplating Process Using AHP and VIKOR Multi Attribute Decision Making Method. *Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, pp. 834-841.

Karimi, A. y otros, 2010. Selection of wastewater treatment process based on the analytical hierarchy process and fuzzy analytical hierarchy process methods. *International Journal Of Environmental Science And Technology*, 8(2), pp. 267-280.

Kaya, I., 2011. Multicriteria location selection of wastewater treatment plant by fuzzy analytic hierarchy process. *Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing*, Issue 17, pp. 305-320.

Kostlan, E., 1991. Statistical complexity of dominant eigenvector calculation.. *Journal of Complexity*, 7(4), pp. 371-379.

Landeta, J., 1999. *El método Delphi*. Barcelona: Ariel.

Landeta, J., Barrutia, J. & Lertxundi, A., 2011. Hybrid Delphi: A methodology to facilitate contribution from experts in professional contexts. *Technological Forecasting and Social Change*, 78(9), p. 1629–1641.

Lazarova, V., Sturny, V. & Sang, G., 2012. Relevance and benefits of urban water reuse in tourist areas. *Water*, Volumen 4, pp. 107-122.

Ma, D. , Gao, B., Hou, D., Wang, Y., Yue, Q. & Li, Q., 2013. Evaluation of a submerged membrane bioreactor (SMBR) coupled with chlorine disinfection for municipal wastewater treatment and reuse. *Desalination*, Volumen 313, pp. 134-139.

Mosa, A., Rahmat, R., Ismail, A. & Taha, M., 2013. Expert System to Control Construction Problems in Flexible Pavements. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(4), pp. 307-323.

Opricovic, S., 1990. Programski paket VIKOR za visekriterijumsko kompromisno rangiranje. *SYM-OP-IS*.

Opricovic, S., 1998. *Multicriteria optimization of civil engineering systems*. Belgrade (Yugoslavia): Faculty of Civil Engineering.

Opricovic, S. & Tzeng, G., 2002. Multicriteria Planning of Post-Earthquake Sustainable Reconstruction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Volumen 17, pp. 211-220.

Opricovic, S. & Tzeng, G., 2004. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, Volumen 156, pp. 445-455.

Osorio-Gómez, J. C. & Orejuela-Cabrera, J. P., 2008. Año XIV, No 39, Septiembre de 2008. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701 247. *Scientia et Technica*, XIV(39), pp. 247-252.

Pérez Calvo, M. d. M., 2006. *Tratamiento avanzado de aguas residuales para riego mediante oxidación con ozono: una alternativa ecológica.* Madrid, Fundación CONAMA.

Pérez-Morales, A., Gil-Meseguer, E. & Gómez-Espín, J.-M., 2014. Las aguas residuales regeneradas como recurso para los regadíos de la Demarcación Hidrográfica del Segura (España). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, Issue 64, pp. 151-175.

Pophali, G., Chelani, A. & Dhodapkar, R., 2011. Optimal selection of full scale tannery effluent treatment alternative using integrated AHP and GRA approach. *Expert Systems with Applications*, 38(9), pp. 10889-10895.

Richter, S., Völker, J., Borchardt, D. & Mohaupt, V., 2013. Integrated water resources management and implementation of the EU-Water Framework Directive: lessons learnt and future perspectives from the experience in Germany. *Environmental Earth Sciences*, 69(2), pp. 719-728.

Rosenblum, J. y otros, 2012. Ozonation as a clean technology for fresh produce industry and environment: sanitizer efficiency and wastewater quality. *Journal of Applied Microbiology*, 113(4), pp. 837-845.

Rowe, G. & Wright, G., 1999. The Delphi technique as a forecasting tool: issues and analysis. *International Journal of Forecasting*, Volumen 15 , p. 353–375.

Saaty, T., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.

Saaty, T., 2012. *Decision making for leaders. The analytic hierarchy process for decisions in a complex world.* Third edition ed. Pittsburgh (USA): RWS Publications.

Saaty, T., 2013. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory With the Analytic Hierarchy Process (Analytic Hierarchy Process Series, Vol. 6).* s.l.:RWS Publications.

Saaty, T. L. & Vargas, L. G., 2012. The Seven Pillars of the Analytic Hierarchy Process. En: *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. s.l.:International Series in Operations Research & Management Science, pp. 23-40.

Sadeghi, N., Fayek, A. & Pedrycz, W., 2010. Fuzzy Monte Carlo Simulation and Risk Assessment in Construction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 25(4), pp. 238-252.

Salas, J., 2004. *Tecnologías de Depuración: Situación Actual y Perspectivas*. Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua. s.l.:Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA).

Sato, T. y otros, 2013. Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use.. *Agricultural Water Management*, Volumen 130, pp. 1-13.

Savas, E., 1977. *The organization and efficiency of solid waste collection*. Lexington, MA: Lexington Books.

Scholz, M., 2013. Sustainable water systems. *Water*, 5(1), pp. 239-242.

Singhirunnusorn, W. & Stenstrom, M., 2009. Appropriate wastewater treatment systems for developing countries: criteria and indicator assessment in Thailand. *Water Science & Technology—WST*, 59(9), pp. 1873-1884.

Srdjevic, B., Srdjevic, Z., Blagojevic, B. & Suvocarev, K., 2013. A two-phase algorithm for consensus building in AHP-group decision making. *Applied Mathematical Modelling*, Issue 37, p. 6670–6682.

Tang, X., Wu, Q.Y., Du, Y., Yang, Y. & Hu, H.Y., 2014. Anti-estrogenic activity formation potential assessment and precursor analysis in reclaimed water during chlorination. *Water Research*, Volumen 48, pp. 490-497.

-
- Trillo-Montsorío, J. d. D., 1995.** El saneamiento. Historia reciente, estado actual y perspectivas de futuro. *Ingeniería y Territorio (Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos)*, Issue 31.
- Udias, A., Galbiati, L., Elorza, F.J., Efremov, R., Pons, J., Gómez, A., Alegre, A., Arrosa, M. & Borrás, G., 2010.** *Multicriteria genetic algorithm for wastewater reclamation and reuse decision*. Barcelona, s.n., pp. 1241-1248.
- Van der Merwe, B., du Pisani, P., Menge, J. & Köning, E., 2008.** Water reuse in Windhoek, Namibia: 40 years and still the only case of direct water reuse for human consumption. *En: Water Reuse, An International Survey of current practice, issues and needs. Scientific and technical Report*, Volumen 20, pp. 434-454.
- Varela-Ruiz, M., Díaz-Bravo, L. & García-Durán, R., 2012.** Descripción y usos del método Delphi en investigaciones del área de la salud. *Investigación en Educación Médica*, 1(2), pp. 90-95.
- Von Sperling, M. & Oliveira, S., 2007.** Reliability analysis of stabilization ponds systems.. *Water Science And Technology*, 55(11), pp. 127-134.
- Wei, J. & Lin, X., 2008.** The Multiple Attribute Decision-Making VIKOR Method and its Application. *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. WiCOM '08. 4th International Conference*, pp. 1-4.
- Yeonjoo, K., Eun-Sung, C., Sang-Mook, J. & Sang-Ug, K., 2013.** Prioritizing the best sites for treated wastewater instream use in an urban watershed using fuzzy TOPSIS. *Resources, Conservation and Recycling*, Issue 73, pp. 23-32.
- Zeng, G., Jiang, R., Huang, G., Xu, M. & Li, J., 2007.** Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis. *Journal of Environmental Management*, Volumen 82, pp. 250-259.
- Zhang, R., Zhang, X., Yang, J. & Yuan, H., 2013.** Wetland ecosystem stability evaluation by using Analytical Hierarchy Process (AHP) approach in Yinchuan Plain, China. *Mathematical and Computer Modelling*, Volumen 57, pp. 366-374.

Zhou, H. & Smith, D., 2001. Advanced technologies in water and wastewater treatment. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Volumen 28, pp. 49-66.

Zurita, F. & White, J., 2014. Comparative study of three two-stage hybrid ecological wastewater treatment systems for producing high nutrient, reclaimed water for irrigation reuse in developing countries. *Water*, 6(2), pp. 213-228.

ANEXO:

PUBLICACIÓN

ANEXO: PUBLICACIÓN.

Durante la realización de esta tesis doctoral, se ha redactado un artículo que fue aceptado el 9 de septiembre de 2014, y publicado el 15 de septiembre de 2014, con número DOI 10.3390/w6092732 en una revista de distribución internacional, WATER, con ISSN 2073-4441.

Según los datos obtenidos el 15 de septiembre de 2015, las características de la revista son:

Full Journal Title:	Water	Eigenfactor[®] Metrics
ISO Abbrev. Title:	Water	Eigenfactor[®]Score 0,00212
JCR Abbrev. Title:	WATER-SUI	Article Influence[®] Score 0,473
ISSN:	2073-4441	Issues / Year 12
Language:	ENGLISH	Journal Country / Territory: SWITZERLAND
Publisher:	MDPI AG	POSTFACH, CH-4005 BASEL, SWITZERLAND
Journal Rank in Categories:	For 2014, the journal WATER has an Impact Factor of 1,428	

El título de la publicación es “*Selecting a Sustainable Disinfection Technique for Wastewater Reuse Projects*”.

Se adjuntan dos páginas de la misma, la primera y la última, como referencia.

Article

Selecting a Sustainable Disinfection Technique for Wastewater Reuse Projects

Jorge Curiel-Esparza ^{1,*}, Marco A. Cuenca-Ruiz ², Manuel Martín-Utrillas ¹
and Julian Canto-Perello ³

¹ Physical Technologies Center, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Valencia 46022, Spain; E-Mail: mgmartin@fis.upv.es

² Department of Applied Physics, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Valencia 46022, Spain; E-Mail: marcueru@doctor.upv.es

³ Department of Construction Engineering and Civil Engineering Projects, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Valencia 46022, Spain; E-Mail: jcantope@cst.upv.es

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: jcuriel@fis.upv.es;
Tel.: +34-96-387-7520; Fax: +34-96-387-7529.

Received: 17 June 2014; in revised form: 27 August 2014 / Accepted: 9 September 2014 /

Published: 15 September 2014

Abstract: This paper presents an application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) by integrating a Delphi process for selecting the best sustainable disinfection technique for wastewater reuse projects. The proposed methodology provides project managers a tool to evaluate problems with multiple criteria and multiple alternatives which involve non-commensurable decision criteria, with expert opinions playing a major role in the selection of these treatment technologies. Five disinfection techniques for wastewater reuse have been evaluated for each of the nine criteria weighted according to the opinions of consulted experts. Finally, the VIKOR method has been applied to determine a compromise solution, and to establish the stability of the results. Therefore, the expert system proposed to select the optimal disinfection alternative is a hybrid method combining the AHP with the Delphi method and the VIKOR technique, which is shown to be appropriate in realistic scenarios where multiple stakeholders are involved in the selection of a sustainable disinfection technique for wastewater reuse projects.

Keywords: wastewater reuse; disinfection technologies; expert systems; AHP-Delphi; VIKOR; multicriteria decision making

31. Zhou, H.; Smith, D. Advanced technologies in water and wastewater treatment. *Can. J. Civ. Eng.* **2001**, *28*, 49–66.
32. Zurita, F.; White, J. Comparative study of three two-stage hybrid ecological wastewater treatment systems for producing high nutrient, reclaimed water for irrigation reuse in developing countries. *Water* **2014**, *6*, 213–228.
33. Avila, C.; Garfi, M.; Garcia, J. Three-stage hybrid constructed wetland system for wastewater treatment and reuse in warm climate regions. *Ecol. Eng.* **2013**, *61*, 43–49.
34. Hijosa-Valsero, M.; Matamoros, V.; Martin-Villacorta, J.; Bécares, E.; Bayona, J. Assessment of full-scale natural systems for the removal of PPCPs from wastewater in small communities. *Water Resour.* **2010**, *44*, 1429–1439.
35. Saaty, T. *Decision Making for Leaders. The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*, 3rd ed.; RWS Publications: Pittsburgh, PA, USA, 2012.
36. Saaty, T. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the ANALYTIC Hierarchy Process (Analytic Hierarchy Process Series, Vol. 6)*; RWS Publications: Pittsburgh, PA, USA, 2013.
37. Saaty, T. *The Analytic Hierarchy Process*; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1980.
38. Canto-Perello, J.; Curiel-Esparza, J.; Calvo, V. Criticality and threat analysis on utility tunnels for planning security policies of utilities in urban underground space. *Expert Syst. Appl.* **2013**, *40*, 4707–4714.
39. Opricovic, S. *Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems*; Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade: Belgrade, Yugoslavia, 1998.
40. Opricovic, S.; Tzeng, G. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Eur. J. Oper. Res.* **2004**, *156*, 445–455.
41. Fouladgar, M.; Yazdani-Chamzini, A.; Yakhchali, S.; Ghasempourabadi, M.; Badri, N. Project portfolio selection using VIKOR technique under Fuzzy environment. In Proceedings of the 2nd International Conference on Construction and Project Management, Singapore, 16–18 September 2011; pp. 236–240.
42. Antucheviciene, J.; Zavadskas, E.; Zakarevicius, A. Ranking redevelopment decisions of derelict buildings and analysis of ranking results. *Econ. Comput. Econ. Cybern. Stud. Res.* **2012**, *46*, 37–62.
43. Caterino, N.; Iervolino, I.; Manfredi, G.; Cosenza, E. Comparative analysis of multi-criteria decision-making methods for seismic structural retrofitting. *Computer-Aided Civ. Infrastruct. Eng.* **2009**, *24*, 432–445.
44. Opricovic, S.; Tzeng, G. Multicriteria planning of post-earthquake sustainable reconstruction. *Computer-Aided Civ. Infrastruct. Eng.* **2002**, *17*, 211–220.

© 2014 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>).
