

Conceptualización de un modelo de selección de tecnología para tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades (Parte A)

Conceptualization of a wastewater treatment technology selection model for the small communities (Part A)

Espinosa-Jiménez, Carlos^{1*}; Rodríguez-Ayala, Jorge¹; Ramírez-Rodríguez, Stefanny²; Duarte-Tavárez, Magda³.

¹Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT), Vicerrectorado Académico Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.

²Departamento de Hidráulica y Sanitaria, Escuela de Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.

³ Universidad Autónoma de Santo Domingo, Rep. Dom. Consultor Privado.

caesji1958@gmail.com.

DOI: <https://doi.org/10.53766/CEI/2021.43.02.02>

Resumen

Se presenta la conceptualización de un modelo de selección de tecnología para tratamiento de aguas residuales municipales en el medio rural y en pequeñas comunidades. El modelo contempla la definición de criterios de selección y tecnologías promisorias para el lugar de emplazamiento. Los criterios de selección son ponderados en el lugar de emplazamiento y valorados con respecto a las tecnologías promisorias. Mediante una matriz multicriterio se establece el orden de aptitud de las tecnologías promisorias para su implementación en el lugar de emplazamiento. Entre las conclusiones destaca que el modelo de selección de tecnología para tratamiento de aguas residuales conceptualizado constituye una herramienta de fácil y rápida implementación para la toma de decisión de inversiones en infraestructura hidrosanitaria en el medio rural y en pequeñas comunidades. Se recomienda ilustrar la implementación del mismo, mediante su aplicación en un caso específico.

Palabras clave: modelos de selección, modelo conceptual, selección de tecnología, tratamiento de aguas, aguas residuales, pequeñas comunidades, medio rural.

Abstract

The conceptualization of a technology selection model for municipal wastewater treatment in rural areas and in small communities is presented in this paper. The model provides the definition of selection criteria and promising technologies for the site of emplacement. The selection criteria are weighted at the site and assessed against the promising technologies. By means of a multi-criteria matrix, it is established the order of suitability of promising technologies for implementation at the site. Among the conclusions, it stands out that the conceptualized model of technology selection for wastewater treatment constitutes a tool of easy and quick implementation for the decision making of investments in hydrosanitary infrastructure in rural areas and in small communities. It is recommended to illustrate the implementation of the same, by applying it in a specific case.

Keywords: selection models, conceptual model, technology selection, water treatment, wastewater, small communities, rural environment.

1 Introducción

El manejo de las aguas residuales tiene como objetivo fundamental proteger la salud humana y minimizar el detrimento de la calidad de los cuerpos de agua receptores; en la actualidad las mayores preocupaciones y problemas se derivan de los efectos de los contaminantes presentes en el agua residual al ser vertidos al ambiente.

La selección de tecnologías en el área de la ingeniería tiene como finalidad estudiar y proponer mejores prácticas para la selección de bienes tecnológicos bajo criterios que optimicen los recursos. Esto representa un reto importante, ya que en un mundo globalizado, las empresas necesitan ser más competitivas y esto se puede lograr mediante criterios que permitan la selección de tecnologías que ayuden a tomar decisiones entre tecnologías emergentes (Uribe, 2018).

Por otra parte, para lograr que las inversiones en agua y saneamiento generen los resultados esperados en el mejoramiento de la calidad de vida, es necesario una visión sistémica del problema, donde el agua sea administrada como un recurso limitado, de múltiples usos y que las soluciones sean formuladas bajo criterios apropiados de asignación y protección. Por lo anteriormente mencionado, la toma de decisiones generalmente va acompañada de herramientas metodológicas que facilitan el proceso de selección de una tecnología; en la misma se consideran múltiples aspectos o criterios desde puntos de vistas técnicos, ambientales, sociales y económicos, lo cual garantiza la sostenibilidad de la tecnología implementada (Galvis y col., s.f).

Los modelos de selección de tecnología nos facilitan tomar decisiones con herramientas que permitan las comparaciones de una forma sencilla, objetiva, económica, todo con base en conocimientos generales sobre el proyecto y los procesos de tratamiento involucrados en las distintas opciones tecnológicas. Estas metodologías permiten a los involucrados, llegar a una mesa de negociación con buenas elecciones para obtener un mejor contrato y contar con elementos claros y transparentes (Noyola y col., 2013).

En algunos casos el ingeniero requiere del uso de modelos de selección de tecnología para depurar aguas residuales municipales en la ejecución de proyectos, en los cuales el modelo de selección es una herramienta, mas no es el objetivo del proyecto. Los modelos de selección de tecnología por lo general requieren de mucha información, lo cual no permite su implementación en proyectos con cronogramas de corta duración. Es por esta razón que se hace necesario el desarrollo conceptual de un modelo de selección de tecnología que permita la toma de decisiones a partir de información sencilla y de fácil elaboración y obtención,

que haga compatible su utilización con el tiempo de ejecución del proyecto.

2 Antecedentes.

Teclé y col., (1986), señalan que en los primeros modelos de selección de tecnología de tratamiento de aguas residuales, primaron los criterios económicos sobre criterios de otra índole como factores técnicos u operativos. Posteriormente se empiezan a incluir criterios de tipo ambiental debido a la necesidad de incorporar el concepto de sostenibilidad del sistema de tratamiento (Balkema y col., 2002).

En 2007, se propone la conjugación del proceso analítico jerárquico y el análisis relacional y es aplicado a la evaluación de cuatro alternativas para el tratamiento de aguas residuales con ocho criterios; en esta experiencia los autores relatan que dicha evaluación es subjetiva y está basada en la experiencia e ignora las múltiples relaciones entre los índices evaluados (Zeng y col., 2007).

Posteriormente en el 2011, se implementó el PAJD (Proceso Analítico Jerárquico Difuso), para hacer el ordenamiento de cinco alternativas de tratamiento de aguas residuales. Karimi y col., (2011) expresan la ventaja de este método al eliminar la imprecisión o vaguedad de la naturaleza lingüística.

El uso de metodologías multicriterio para el tratamiento de aguas residuales domésticas, se evidencia por primera vez en el artículo de Teclé y Fogel en el año 2012, donde se menciona la evaluación de tres técnicas de selección a saber: Compromise Programming, el cual se basa en la medida de una distancia de las alternativas a una solución ideal; Teoría del Juego Cooperativo, se basa en la búsqueda de una matriz de recompensa que acuerdan un grupo de participantes y la última técnica utilizada es Electre-, la cual utiliza el principio de comparación por partes para eliminar las variables menos deseables y elegir las alternativas de preferencia de acuerdo a su nivel de aceptabilidad.

En el 2014, Molino y col, utilizan el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ), enfocado en evaluar la sostenibilidad de siete tecnologías de tratamiento secundario, mediante diecisiete criterios utilizando diversos escenarios. Posteriormente en 2015 proponen una aproximación al problema de calificar alternativas de tratamiento de aguas residuales en comunidades pequeñas mediante un proceso analítico de la red; dicha metodología consiste en un proceso analítico jerárquico que incorpora las relaciones entre atributos, aun cuando no pertenezcan a un mismo grupo, esto exige un esfuerzo computacional mayor. En esta aplicación se incorpora la opinión de expertos.

En España se ha adoptado el desarrollo de una herramienta de soporte a la decisión ambiental para el problema de tratamiento de las aguas residuales, y se

han publicado una serie de estudios. Se destaca el presentado por Garrido y col., (2016) en el cual busca la identificación y análisis de la tecnología de tratamiento más apropiada para el diseño de nuevos sistemas o la mejora de los obsoletos; en el mismo se utilizó tres escenarios constituidos a partir de la composición del agua residual, destino del agua tratada, tamaño de la población, entre otros criterios.

Espinosa (2019) presenta una relación entre factores y variables involucrados en la toma de decisión en selección de tecnología para tratar aguas residuales municipales, la cual se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Relación entre factores y variables involucrados en la selección de tecnología para tratar residuales líquidos municipales. Fuente: Espinosa (2019)

Factores	Variables
Demográficos y socioculturales	Tamaño población, nivel educativo, cobertura y cantidad agua potable, existencia y tipo de alcantarillado
Características agua residual	Origen, composición y caudal
Climáticos	Temperatura, precipitación y vientos
Características del terreno	Topografía, permeabilidad y nivel freático
Capacidad y disponibilidad a pagar	Capacidad de pago, tarifa y disponibilidad a pagar
Costos	Costos de inversión, Operación y Mantenimiento (OyM) terreno, recuperación de recursos
Objetivos del tratamiento	Cumplir normas de efluentes y reuso
Disponibilidad de recursos	Energía, mano de obra, equipos y materiales
Aspectos tecnológicos	Impacto ambiental, disponibilidad terreno, generación subproductos, facilidad de O y M.

Magda Duarte (com per) afirma que en el proceso de selección de tecnología para depurar aguas residuales deben considerarse los siguientes criterios: naturaleza del líquido residual, normativa legal, capacidad de la planta, el objetivo del tratamiento, requerimientos de espacio de las tecnologías, costos del terreno disponible y su topografía, el nivel freático, disponibilidad y costos de la energía eléctrica, complejidad tecnológica y disponibilidad local de personal capacitado, emisión de gases de efecto invernadero y la dirección predominante del viento en el lugar de emplazamiento.

La importancia de una adecuada selección de tecnología está siendo cada vez más reconocida. Por esta razón, el Instituto Cinara, inició desde 1999 el desarrollo de una estrategia para la selección de tecnología en el control de la contaminación por aguas residuales. En 2004 formalizaron con otros institutos un modelo que tiene como punto de partida la priorización de las inversiones y los objetivos ambientales. También

considera aspectos técnicos, socioculturales, institucionales, económicos y financieros. Este modelo ha sido desarrollado para Colombia, sin embargo gran parte de los criterios y metodologías utilizados pueden ser aplicadas a otros países (Galvis y col., s.f).

3 Objetivo.

El objetivo es este artículo es desarrollar y presentar la conceptualización de un modelo de selección de tecnología para depurar aguas residuales municipales en pequeñas comunidades rurales.

4 Conceptualización del modelo.

El marco conceptual del modelo propuesto son los sistemas integrados, que contemplan el reuso del efluente y los subproductos. Clásicamente se distinguen dos niveles en el proceso de selección de tecnología para tratar aguas residuales:

Primer nivel: se refiere a restricciones impuestas por la caracterización y cuantificación del líquido residual y el cuerpo receptor.

Segundo nivel: se relaciona con restricciones impuestas por el tamaño y densidad de la población, el clima y el costo de la energía.

4.1 Tecnologías promisorias (opciones tecnológicas promisorias).

Se consideran tecnologías promisorias para el tratamiento de aguas residuales aquellas que por sus características pueden ser implementadas en pequeñas comunidades. Esas características se refieren a su potencial de adaptación y resiliencia al medio físico-natural y socio-económico del lugar de emplazamiento. En este sentido cabe mencionar las siguientes tecnologías: pozos sépticos, lagunas de estabilización, reactores anaeróbios (filtros anaeróbios y tipo UASB), filtros percoladores, humedales construidos, biodiscos y pequeños sistemas de lodos activados.

4.2 Criterios de selección.

Son los criterios sobre los cuales se realiza la toma de decisiones. Se refieren a características propias de las tecnologías promisorias con respecto a sus requerimientos de espacio, desempeño, costos de implementación, consumo energético y complejidad tecnológica para la operación y el mantenimiento.

4.3 Valoración de los criterios de selección respecto a las tecnologías promisorias.

Los criterios de selección son valorados para cada tecnología promisorias. La valoración implica jerarquizar en una escala numérica la aptitud de cada tecnología promisorias con relación a cada criterio de selección.

4.4 Ponderación de los criterios de selección en el lugar de emplazamiento.

Los criterios de selección son ponderados en el lugar de emplazamiento, tomando en consideración la realidad del medio físico-natural y socio-económico, disponibilidad de servicios públicos como electricidad, alcantarillado sanitario, así como la importancia político territorial del lugar de emplazamiento. La ponderación implica jerarquizar en una escala numérica la aptitud del lugar de emplazamiento con relación a cada criterio de selección.

4.5 La matriz multicriterio.

La matriz multicriterio propuesta, para realizar la toma de decisión, se presenta en la Tabla 2. En esta matriz hay que definir los criterios de selección y las tecnologías promisorias. Luego los criterios de selección se ponderan en el lugar de emplazamiento y se valoran respecto a cada tecnología promisoria.

Tabla 2. Matriz multicriterio para establecer el orden de aptitud de opciones tecnológicas en un determinado emplazamiento. Herramienta para seleccionar tecnología en tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades. Fuente: Elaboración propia.

CRITERIOS DE SELECCIÓN (CS)	PONDERACIÓN	OPCIONES TECNOLÓGICAS (OT)											
		OT ₁		OT ₂		OT ₃		OT _{n-1}		OT _n			
		V	VXP	V	VXP	V	VXP	V	VXP	V	VXP		
CS ₁	P ₁												
CS ₂	P ₂												
CS ₃	P ₃												
CS _{n-1}	P _{n-1}												
CS _n	P _n												
TOTAL (Σ VxP _i)													
ORDEN DE APTITUD													

CS: Criterios de selección. OP: Opciones tecnológicas. P: Ponderación. V: Valoración.

La Tabla 3 contiene información que orienta la valoración de los criterios de selección con respecto a las tecnologías promisorias. La Tabla 4 presenta la interpretación de los criterios de selección respecto a la

valoración en el lugar de emplazamiento. La Tabla 5 contiene orientación para la valoración de los criterios de selección respecto a las tecnologías promisorias. Con base en la información de las tablas anteriores es posible completar la matriz valorando y ponderando los criterios de selección.

4.6 Interpretación de los resultados.

Completada la matriz multicriterio, el orden de aptitud de las tecnologías promisorias consideradas se establece por orden decreciente (de mayor a menor) de la sumatoria de los productos VxP. El orden de aptitud así establecido orientará y/o determinará la selección de la tecnología más apropiada en el emplazamiento considerado.

5 Conclusiones y recomendaciones.

El modelo de selección de tecnología para tratamiento de aguas residuales conceptualizado constituye una herramienta de fácil y rápida implementación para la toma de decisiones de inversiones en infraestructura hidrosanitaria en el medio rural y en pequeñas comunidades.

El resultado de la selección se refiere al reactor principal en tratamiento secundario en el tren de tratamiento. Lo anterior implica que deben definirse además las operaciones y procesos requeridos en tratamiento primario y terciario, para cumplir los objetivos de la depuración. De esta manera queda definido el tren de tratamiento requerido en sus tres fases.

Las pequeñas comunidades y el medio rural se localizan en un medio físico natural que facilita la concepción y la implementación de sistemas integrados, basados en el reuso del efluente y los subproductos. Esta particular condición favorece y contribuye a la sostenibilidad del sistema de tratamiento de aguas residuales una vez entre en operación.

Se recomienda que los resultados del modelo de selección conceptualizado, sean presentados a la comunidad, y de ser posible que la comunidad los valide, a través de sus instancias organizacionales legales.

Se recomienda ilustrar la implementación del modelo de selección de tecnología conceptualizado y desarrollado, mediante su aplicación en un caso específico.

Tabla 3. Características de algunas tecnologías promisorias. Fuente: Elaboración propia a partir de revisión de literatura.

TIPO DE TECNOLOGIA.	POBLACION (numero de habitantes.)	TIPO DE POBLACION.	EFICIENCIA DE REMOCION. (%) (Unidad Logarítmica)		COSTOS DE INVERSION. (US\$/hab)	AREA REQUERIDA. (m ² /hab.)	EQUIPOS NECESARIOS.	REQUERIMIENTOS DE ENERGIA. (kwh/hab.-año)	CARACTERISTICAS OPERACIONALES.
			DBO	Coliformes Fecales.					
Tanque séptico más pozo o campo de infiltración.	Hasta 250 habitantes. En ciertos casos no aplica.	Nucleada y/o dispersa. No requiere alcantarillado sanitario.	35-40	10 ¹	≤ 15	0,50 a 1,00	Ninguno	Ninguno	Sencilla
Lagunas de Estabilización.	Desde 250 habitantes	Nucleada	75-85	60-99,9	10-15	1,00-2,80	Ninguno	Ninguno	Sencilla
Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (LASE).	Hasta 100.000 habitantes	Nucleada	75-85	10 ¹	35-40	0,15-0,20	Recolector y de purificador gas.	Ninguno	Requiere personal especializado.
Filtros Percoladores	Hasta 100.000 habitantes.	Nucleada	80-90	60-90	60-70	0,20-0,30	Brazo giratorio; de bombas de recirculación; escarificador y prensado de lodos.	7-11	Requiere personal especializado.
Lodos Activados.	Se recomienda para grandes poblaciones. Pequeños sistemas pueden usarse en poblaciones menores.	Nucleada	75-85	60-99,9	70-100	0,20-0,25	Aireadores; bombas de recirculación; escarificadores, centrifugado y prensado de lodos; equipos para recolectar gas.	12-15	Requiere personal especializado.

Tabla 4. Interpretación de los criterios de selección más comunes, para la ponderación de los mismos en el lugar de emplazamiento. Fuente: Elaboración propia.

Criterio de selección	de	Interpretación/cuestionamiento para la ponderación en sitio	Escala de ponderación sugerida
Requerimiento de espacio	de	¿Existen terrenos disponibles en el lugar de emplazamiento, con área suficiente, topografía adecuada, ubicados convenientemente y en zonas no anegadas?	1: poca capacidad, mínima importancia, inexistente, poco probable. 2: mediana capacidad, mediana importancia, existencia con ciertas limitaciones, medianamente probable. 3. sin mayores restricciones
Costo de implementación	de	¿Cuál es la importancia político territorial a nivel regional y nacional del sitio de emplazamiento? Con base a lo anterior qué tan fácil es para la comunidad receptora del proyecto gestionar/captar recursos financieros para implementar infraestructura hidrosanitaria?	
Consumo de energía	de	¿Existe en la zona de emplazamiento energía eléctrica disponible, con suficiente y adecuada potencia y suministro confiable?	
Complejidad tecnológica para operación y mantenimiento	de	Existe en el lugar de emplazamiento personal y mano de obra calificada (o con adecuado nivel educativo que permita formarlo), capaces de realizar adecuadamente las labores de operación y mantenimiento.	

Tabla 5. Valoración de los criterios de selección respecto a las tecnologías promisorias. Fuente: Elaboración propia.

Criterios de selección.	Tecnologías promisorias	Escala de valoración sugerida
Requerimiento de espacio	Tanque séptico más sumidero o campo de infiltración, lagunas de estabilización, reactores anaeróbios (filtros anaeróbios y tipo UASB), filtros percoladores, humedales construidos, pequeños sistemas de lodos activados y biodiscos rotatorios.	Escala de 1 a 5.
Costo de implementación		1: lo menos apto, lo menos adecuado, lo menos conveniente.
Consumos de energía		5: lo más apto, lo más adecuado, lo más conveniente.
Complejidad tecnológica para operación y mantenimiento		2, 3, y 4: apreciaciones intermedias en orden creciente de menos a más.

Referencias.

Balkema A, Preisig H, Otterpohl R, Lambert F, 2002, Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems. *Urban Water*, 4(2), 153-161.

Espinosa C, 2019, Curso Tratamiento de aguas residuales municipales. Especialización GARTA, CIDIAT-ULA, Mérida, Venezuela.

Galvis A, Cardona D, Bernal D, n.d, Modelo conceptual de selección de tecnología para el control de contaminación por aguas residuales domesticas en localidades colombianas menores de 30.000 habitantes, Seltar. Cali: Conferencia Internacional: De la Acción Local a las Metas Globales. Instituto Cinara.

Garrido-Baserba M, Reif R, Molinos-Senante M, Larrea, L, Castillo A, Verdaguer M, 2016, Application of a multi-criteria decision model to select of design choices for WWTPs. *Clean Technologies an Environmental Policity*, 1-13.

Karimi A, Mehrdadi N, Bridhendi G, 2011, Selection of wastewater treatment process based on the analytical hierarchy proces and fuzzy analytical hierarchy process methods. *International Journal of Environmental Sciencia & Techonology* 8(2), 267-280.

Molinos-Senante M, Garrido-Baserba M, Reif R, Hernandez S, 2012, Assessment of wastewater treatment plant design for small communities, Environmental and economic aspects. *Science of the Total Environment*, 11-18.

Molinos-Senante M, Gomez C, Hernandez S, Sala-Garrido R, 2015, Assessment of wastewater treatment alternatives for small communities: An analytic network process approach. *Science of the Total Environment*, 676-687.

Noyola A, Morgan-Sagastume J, Guereca L, 2013, Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales, Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.

Teclé A, Fogel M, 1986, Multiobjective Wastewater Management Planning in a Semi-arid Region. *Hydrology*

and Water Resources in Arizona and the Southwest, 43-61.

Uribe Gómez A, 2018, Selección de tecnología empresarial: una revisión desde literatura. *Revista de I+D Tecnológico. RIDTEC Vol 14, N°2, julio-diciembre.*

Zeng G J, Huang G X, Li J, 2007, Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relation analysis. *Journal of Environmental Management*, Volume 82, Issue 2, 250-259.

Recibido: 20 de septiembre de 2021


Aceptado: 26 de enero de 2022

Espinosa-Jiménez, Carlos: Ingeniero Civil (Intec, República Dominicana, 1981). Magister Scientiae en Obras Hidráulicas (Universidad de los Andes, Venezuela, 1985). Master of Engineering en Ingeniería Sanitaria (IHE-Delft, Holanda, 1997). Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental (UNIVALLE, Colombia, 1999). Especialista en Abastecimiento de Agua Potable y Saneamiento Ambiental. Profesor Titular y Coordinador de Asistencia Técnica del Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial de la Universidad de los Andes (CIDIAT-ULA). Mérida, Venezuela.

 <https://orcid.org/0000-0003-0861-5918>

Rodríguez-Ayala, Jorge Luis: Ingeniero Civil (Universidad de Los Andes, Venezuela, 1987). Especialista en Recursos Hidráulicos (Universidad de Los Andes, Venezuela, 2008). Investigador en Ciencias Básicas Naturales y Aplicadas, de la Universidad de Los Andes adscrito al Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial de la Universidad de los Andes (CIDIAT-ULA). Mérida, Venezuela.

Correo electrónico: jorgerodriguezayala@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-5019-7628>

Ramírez-Rodríguez, Stefanny Andreina: Ingeniero Civil Cum Laude (Universidad de Los Andes, 2018). Especialista en Sistemas de Gestión de Abastecimiento, Recolección y Tratamientos de Aguas en el Centro


Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial de la Universidad de los Andes (CIDIAT-ULA). Profesora de la Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Sanitaria de la Universidad de los Andes. Jefe del área de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes. Representante de la Escuela de Ingeniería Civil ante la Unidad de Información Institucional (UDI-OFAE) de la Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.

Correo electrónico: Stefa19r@gmail.com.

 <https://orcid.org/0000-0002-4148-1774>

Duarte-Tavárez, Magda: *Ingeniero Civil (Universidad Autónoma de Santo Domingo, UASD, 1970). Especialista en Ingeniería Sanitaria (1971) y Maestro en Ingeniería Sanitaria (1972) en la Universidad Nacional Autónoma de México. Profesora de Ingeniería Sanitaria de la UASD y del Instituto Tecnológico de Santo Domingo (Intec). Consultor en Ingeniería Sanitaria y Ambiental en la República Dominicana.*

Correo electrónico: m.duartevda@claro.net.do

 <https://orcid.org/0000-0001-6601-8746>

