

Desarrollo de una herramienta metodológica para la selección y dimensionamiento de humedales artificiales como tecnología sostenible de tratamiento de aguas residuales

Luis Fermín Córdova LópezE-MAIL: cordova@tesla.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE)

Carolina Medina LosadaE-MAIL: carolinamedinalosada@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE)

Luis Alberto Rivero CárdenasE-MAIL: lriveroc89@gmail.com

Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de La Habana

RESUMEN

El crecimiento poblacional y la expansión urbana han incrementado significativamente la generación de aguas residuales, lo que exige soluciones de tratamiento sostenibles, económicamente viables y ambientalmente responsables. Los humedales artificiales constituyen una alternativa tecnológica de bajo consumo energético y sencilla operación; sin embargo, la selección de la variante más adecuada representa un proceso complejo debido a la diversidad de configuraciones existentes y a la multiplicidad de variables que intervienen en la toma de decisiones. El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una herramienta metodológica para la selección y dimensionamiento de humedales artificiales como sistema de tratamiento de aguas residuales en comunidades urbanas y periurbanas. La metodología integra criterios técnicos, ambientales, económicos, sociales y jurídicos, permitiendo evaluar 12 variantes tecnológicas diferentes mediante un análisis multicriterio ponderado. Los resultados demuestran que la herramienta desarrollada optimiza el proceso de selección, reduce la incertidumbre técnica y facilita la adaptación del diseño a las condiciones específicas del sitio de implantación, garantizando el cumplimiento de las normas de vertimiento vigentes.

PALABRAS CLAVE: *aguas residuales, humedales artificiales, herramienta de selección*

Development of a methodological tool for the selection and sizing of constructed wetlands as a sustainable wastewater treatment technology



RECIBIDO

APROBADO

Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ABSTRACT

Population growth and urban expansion have significantly increased wastewater generation, requiring sustainable, economically feasible, and environmentally responsible treatment solutions. Constructed wetlands represent a low-energy and simple-operation technology; however, selecting the most suitable configuration is a complex task due to the diversity of available alternatives and the multiple variables involved in decision-making. This study aims to develop a methodological tool for the selection and sizing of constructed wetlands for wastewater treatment in urban and peri-urban communities. The methodology integrates technical, environmental, economic, social, and legal criteria, evaluating twelve technological variants through a weighted multi-criteria analysis. Results demonstrate that the developed tool optimizes the selection process, reduces technical uncertainty, and facilitates design adaptation to site-specific conditions while ensuring compliance with discharge regulations.

KEYWORDS: *constructed wetlands, selection tool, sizing, wastewater, sustainability*

01 INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua constituye uno de los principales problemas ambientales asociados al desarrollo urbano contemporáneo. Las aguas residuales o aguas negras por lo general son una mezcla de todo efluente generado por diversas actividades antropogénicas que son derramadas sin tratamiento, ocasionando impactos negativos hacia el medio ambiente y la salud humana (Romero, 2010).

Las características de estas aguas dependerán mucho del estilo de vida y costumbres de las personas en el hogar, la calidad del agua que reciben, la red de donde se proveen y el tipo de red de repartición (Wilson et al., 2020). Las aguas residuales urbanas son biodegradables, esto quiere decir que pueden ser purificadas por medio de tratamientos biológicos (Trapote, 2013).

El tratamiento adecuado de aguas residuales antes de su descarga es una forma de promover la prevención de la contaminación del agua (Inyinbor et al., 2018). Este consiste en una combinación de procesos y operaciones físicas, químicas y biológicas con la finalidad de remover sólidos, materia orgánica y, en ciertos casos, hasta nutrientes de las aguas residuales (Sonune & Ghate, 2004). La finalidad del tratamiento de aguas residuales es evitar la contaminación de los cursos y cuerpos de agua receptores. De esta manera se impide el daño a abastecimientos públicos, privados e industriales de suministro de agua; el deterioro de cuerpos de agua con fin recreacional y de esparcimiento; el perjuicio a las actividades acuícolas y agrícolas, además del impacto a nivel ecológico (Rojas, 2002).

En muchos países en desarrollo, la limitada disponibilidad de recursos financieros y energéticos dificulta la implementación de sistemas convencionales de tratamiento, lo que favorece la búsqueda de tecnologías extensivas basadas en procesos naturales (Zurita et al., 2011). Por lo cual, es primordial considerar algunas técnicas existentes como los humedales artificiales para la depuración de aguas residuales que cumplan con algunos criterios: económicos, ecológicos, técnicos y sociales (López, 2016).

Los humedales artificiales son considerados sistemas socio-ecológicos que otorgan beneficios ambientales al grupo que lo rodea. Estos se componen de elementos naturales como son el agua, el suelo, la vegetación, y de elementos humanos como la fuerza de trabajo para su mantenimiento y la organización social para aprovechar sus beneficios en cuanto al uso y manejo del agua (Granados et al., 2019).

No obstante, la selección de la configuración óptima —flujo superficial, subsuperficial horizontal, subsuperficial vertical o sistemas híbridos (Idris et al., 2010)— requiere evaluar múltiples variables técnicas y contextuales. La ausencia de herramientas integradas que sistematicen este proceso motiva el desarrollo de la presente investigación.

El objetivo general es desarrollar una herramienta que permita seleccionar y dimensionar la tecnología de humedales artificiales más adecuada según las condiciones específicas del proyecto.

Variantes de HA	Autonomía eléctrica (salvo limitaciones topográficas)	Red unitaria	Actividad intermitente	Área requerida	Rendimientos de tratamiento garantizados: factor de reducción % (concentraciones límites mg/L)				Tratamiento de gérmenes patógenos (módulo UV)
					DQO	SST	NTK	NT	
2 HA NS capa filtrante 30 cm	✓	✓	✗	0,8 m²/HE	75 % (125 mg/L)	80 % (50 mg/L)	60 % (40 mg/L)	20 % (60 mg/L)	✗
2 HA NS capa filtrante 30 cm + recirculación	✗	✓ (lámina de agua diaria < 70 cm)	✓ (atención al consumo eléctrico)	0,8 m²/HE	75 % (125 mg/L)	85 % (30 mg/L)	60 % (40 mg/L)	20 % (60 mg/L)	✗
2 HA NS/S capa filtrante 30 cm	✓	✓	✓	0,8 m²/HE	85 % (125 mg/L)	90 % (25 mg/L)	60 % (40 mg/L)	50 % (50 mg/L)	✓
2 HA NS capa filtrante 80 cm	✓	✓	✓ posible si hay recirculación	0,8 m²/HE	90 % (100 mg/L)	90 % (25 mg/L)	80 % (15 mg/L)	20 % (60 mg/L)	✓
2 HA NS/S + 2 HAv	✓	✓	✓ posible si hay recirculación (estrés hídrico en la segunda etapa)	1,6 m²/HE	90 % (75 mg/L)	95 % (15 mg/L)	90 % (6 mg/L)	70 % (35 mg/L)	✓
2 HA NS/S + LB	✗	✓	✓	0,9 m²/HE	90 % (75 mg/L)	95 % (15 mg/L)	90 % (6 mg/L)	70 % (35 mg/L)	✓
2 HA NS + HAh	✓	✓	✓	1,8 m²/HE	85 % (125 mg/L)	90 % (25 mg/L)	70 % (20 mg/L)	70 % (35 mg/L)	✓

✓ = possible ✗ = not possible

Figura 2.2. Síntesis de la información para la selección de las variantes de humedales artificiales (HA) (Lombard Latune & Molle, 2017).

	HA IS (n = 45)											
	Aguas brutas (mg/L)				Aguas tratadas (mg/L)				Factor de reducción (%)			
	Máx	Prom	Mín	ET	Máx	Prom	Mín	ET	Máx	Prom	Mín	ET
DBO ₅	560	245	30	163	90	17	3	16	98 %	90 %	74 %	6 %
DQO	1240	585	109	296	184	75	23	32	96 %	83 %	50 %	10 %
DQOf	671	244	36	135	114	50	15	22	93 %	75 %	45 %	12 %
SST	648	263	49	165	81	28	3	20	99 %	86 %	35 %	12 %
NTK	123	65	7	32	45	16	2	11	98 %	68 %	12 %	23 %
N-NH ₄	120	52	6	31	35	13	0	9	100 %	68 %	4 %	26 %
N-NO ₃	1.5	0,7	0.45	0,34	66	21	0.1	16				
NT	124	66	7	33	74	36	11	17	75 %	42 %	2 %	18 %
PT	23,4	10,2	1.7	4.8	11,3	4,9	1,3	2	91 %	46 %	2 %	26 %

Figura 2.3. Síntesis de los análisis realizados en las muestras de entrada y salida del filtro: una sola etapa NS (Lombard Latune & Molle, 2017).

	HA IS/S (n = 48)											
	Aguas brutas (mg/L)				Aguas tratadas (mg/L)				Factor de reducción (%)			
	Máx	Prom	Min	ET	Máx	Prom	Min	ET	Máx	Prom	Min	ET
DBO₅	680	344	32	205	60	12	2	10	98 %	93 %	68 %	5 %
DQO	1394	696	92	371	196	85	15	46	94 %	85 %	66 %	7 %
DQOf	558	241	74	116	97	59	9	28	91 %	72 %	12 %	15 %
SST	700	282	28	175	70	15	3	12	98 %	93 %	64 %	5 %
NTK	130	85	31	25	51	18	3	14	96 %	79 %	39 %	15 %
N-NH₄	110	64	21	21	44	16	2	13	97 %	76 %	24 %	19 %
N-NO₃	9,32	0,71	0,01	1,28	75	13	0	17,3				
NT	131	85	31	25	66	29	13	14	86 %	62 %	19 %	16 %
PT	20,7	9.3	2.7	3,6	11	5,6	0,7	3	88 %	42 %	-4 %	26 %

Figura 2.4. Síntesis de los análisis realizados en las muestras de entrada y salida del filtro: primera etapa NS/S (Lombard Latune & Molle, 2017).

- Las variables sean comunes a las tecnologías escogidas como base de datos.

A continuación se presenta la Tabla 2.1 donde se resumen las variables de las fuentes analizadas anteriormente a nivel internacional, dividiéndolas en cualitativas y cuantitativas para poder definir las variables con las cuales se va a diferenciar cada tecnología.

Tabla 2.1. Variables cualitativas y cuantitativas según fuentes internacionales

Fuentes de información	Variables cualitativas	Variables cuantitativas
Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zona tropical. Guía de dimensionamiento para zonas tropicales (Lombard Latune, R. & Molle, P.)	X	DBO ₅ ; DQO; DQOf; SST; NH ₄ ; NTK; NT; PT
Treatment Wetlands Vol. VII (IWA)	X	Carga hidráulica; DQO; DBO ₅ ; SST; NTK
Diseño y dimensionamiento de filtros plantados en un contexto tropical (Betzler, L. & OiEau)	Autonomía eléctrica; Red unitaria; Actividad intermitente; Tratamiento de gérmenes patógenos (módulo UV)	DBO ₅ ; DQO; DQOf; SST; NTK; N-H ₄ ; N-NO ₃ ; NT; PT; Área requerida

Leyenda: X No contiene ese tipo de variable.

A continuación, se plantea la Tabla 2.2, la cual se ha generado a partir del análisis de la información consultada y basada en las premisas previamente expuestas. Este resultado es de vital importancia para el desarrollo del proceso de selección, y posteriormente el desarrollo de la herramienta informática.

Se establecieron cinco grupos de variables:

- **Técnicas:** eficiencia de remoción de DBO, DQO, SST y nutrientes.
- **Ambientales:** impacto sobre el entorno y consumo energético.
- **Económicas:** costos de inversión, operación y mantenimiento.
- **Sociales:** aceptación comunitaria y facilidad de gestión.
- **Jurídicas:** cumplimiento de normativas de vertimiento.

Tabla 2.2. Variables definidas para clasificar cada tecnología

Tecnologías	E.E.	M.	E.L.L.	G.L.	R.A.R.T.	T.G.P.	m ² /hab-eq	DBO ₅	DQO	SST	NTK	C.A.
V NS 30 cm	✗	Menor		✗	✗	✗	0,8	90	80	90	30	Bajo
V NS > 50 cm	✗	Menor		✗	✗		0,8	90	90	90	68	Bajo
V NS-S	✗	Menor		✗	✗	✗	0,8	93	85	93	79	Bajo
V NS + V NS	✗	Menor		✗		✗	1,6	99	96	99	51	Medio
V NS-S + V NS	✗	Menor		✗			1,6	99,3	90	95	90	Medio
V NS + H	✗	Menor	✗	✗	✗		2,8	99,3	85	90	70	Medio
TS + V NS	✗	Mayor	✗		✗		1,6	93	92	90	40	Alto
TS + H	✗	Mayor	✗		✗		2,8	93	96	95	57	Alto
V NS + R		Mayor		✗	✗	✗	0,8	99	75	85	60	Alto
V NS-S + R		Mayor		✗	✗	✗	0,8	99,5	97,7	99,5	95,6	Alto
V NS-S + FG		Mayor		✗			0,8	90	90	90	80	Alto
Aireación Forzada		Mayor		✗			0,8	99,9	99	99	99	Alto

Leyenda: E.E.: Energía eléctrica. M.: Mantenimiento. E.L.L.: Episodios de lluvia. G.L.: Gestión de lodos. R.A.R.T.: Reutilización de aguas residuales tratadas. T.G.P.: Tratamiento de gérmenes patógenos. C.A.: Costo aproximado. ✗ No es posible. ✓ Es posible.

Se dimensionaron 12 variantes combinando:

- Humedales de flujo superficial.
- Humedales de flujo subsuperficial horizontal.
- Humedales de flujo subsuperficial vertical.
- Sistemas híbridos en serie.

03 RESULTADOS

3.1. Propuesta de metodología para la selección de alternativas de humedales artificiales

El esquema de funcionamiento del sistema de ayuda se compone de cuatro etapas, que se presentan a continuación: proceso de selección; decisión de la combinación a diseñar; entrada de datos; y resultado final (variantes propuestas).

Proceso de selección

La base de datos se crea a partir de la definición de las variables en la Figura 2.1, la cual plantea las 12 tecnologías, de las cuales la herramienta es capaz de dimensionar 11 de las mismas. El proceso de selección comienza exponiendo cada una de las variables para determinar las opciones de diseño.

- La primera variable a decidir es área por habitante equivalente (m²/hab-eq), definida según tres niveles: bajo, medio y alto, por los coeficientes 0,8; 1,6 y 2,8 respectivamente, anteriormente descritos. Además, estaría la opción de insertar la población, sea real o aproximada, si el usuario no posee conocimientos del nivel en el cual oscila la opción que necesita marcar.
- Las siguientes variables a decidir presentan la opción de marcar para seleccionar.
- La segunda variable es la energía eléctrica, se selecciona según la posibilidad de empleo.
- La tercera variable a tener en cuenta representa la capacidad de asimilación de episodios de lluvia; durante la definición de la misma el usuario es capaz de decidir su uso a partir de los datos complementarios del área de estudio y las intensidades de carga hidráulica a establecer.
- La cuarta variable representa la gestión de lodos, la cual ofrece la opción de realizar el dimensionamiento de la tecnología apropiada según la necesidad de tratamiento de lodos.
- La quinta variable se asocia a la recirculación. La herramienta brinda como opción el incremento de la eficiencia del sistema a partir de someter al afluente a un proceso cíclico, el cual podría requerir el uso de energía eléctrica a partir de la necesidad de aplicar equipos de bombeo.
- La sexta variable que tiene en cuenta el proceso de selección es la reutilización de aguas residuales. A partir de estudios realizados por el usuario se deben definir las características del efluente para su posterior empleo. Lo anterior brinda un margen de posibilidades a tener en cuenta para la definición de la tecnología

apropiada.

- La séptima y última variable es la necesidad o no de la remoción de gérmenes patógenos, la cual, su selección o no se rige por la exigencia de la calidad del agua del cuerpo receptor.

Decisión de la combinación a diseñar

La selección se realiza según la necesidad del usuario. La herramienta contiene una primera tabla clasificando las diferentes combinaciones de tratamiento, las cuales a partir de la selección realizada por el usuario brinda las variables antes expuestas, lo cual resulta de suma importancia para el proceso de selección de la tecnología apropiada según la necesidad y disponibilidad de recursos existente para cada caso de estudio presentado.

El siguiente paso a seguir contiene un formulario, el cual clasifica las alternativas de diseño en función de la selección de las variables. Los resultados obtenidos se representan de manera porcentual según el nivel de posibilidad de coincidencias. Mediante la función «SI», se van decidiendo las variables que irán determinando las posibles combinaciones a diseñar, ya que la función «SI» permite realizar comparaciones lógicas entre un valor y un resultado que se espera; debido a esto dicha función puede tener dos resultados. El primer resultado es si la comparación es Verdadera y el segundo si la comparación es Falsa (Figuras 3.1 y 3.2).

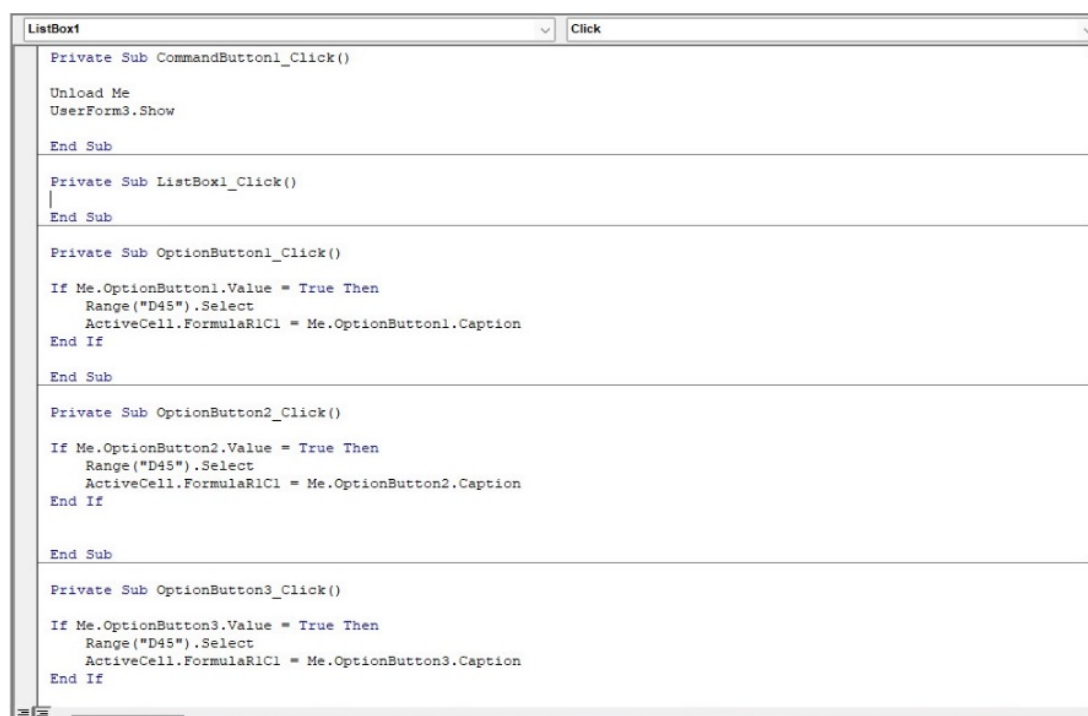


Figura 3.1. Función «SI» utilizada en la herramienta.

La Tabla 3.1 expone un ejemplo de tabla que muestra todas las variantes con su porcentaje de coincidencias de manera descendente a través del promedio de coincidencia de cada variable según la tabla antes descrita. Esta tabla se le muestra al usuario para que observe todas las opciones según la selección.

Luego, como resultado, se recomiendan tres combinaciones a partir de los mayores porcentajes de coincidencia obtenidos, dando la opción al usuario de emplear para el diseño una de las recomendadas.

Entrada de datos

Anteriormente, durante el proceso de selección para la primera variable, se plantean a través de niveles el dimensionamiento por regla general, el cual emplea coeficientes según habitantes equivalentes; y como opción complementaria se ofrece la posibilidad de insertar población aproximada. Ya decidida la combinación a diseñar, se procede a insertar la población, preferiblemente una población real y no aproximada como pudo ser en la ocasión anterior.

ListBox1

Click

```
Range("D45").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = Me.OptionButton1.Caption
End If
End Sub

Private Sub OptionButton2_Click()
If Me.OptionButton2.Value = True Then
Range("D45").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = Me.OptionButton2.Caption
End If
End Sub

Private Sub OptionButton3_Click()
If Me.OptionButton3.Value = True Then
Range("D45").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = Me.OptionButton3.Caption
End If
End Sub

Private Sub UserForm_Initialize()
With Me
.OptionButton1.Caption = [A29].Value
.OptionButton2.Caption = [A30].Value
.OptionButton3.Caption = [A31].Value
End With
End Sub
```

Figura 3.2. Continuación de la función «SI» utilizada en la herramienta.

Tabla 3.1. Coincidencias por variante

Variantes	Coincidencias
VNS 30	85,71 %
VNS/S	85,71 %
VNS + H	85,71 %
TS + VNS	78,57 %
VNS >50	78,57 %
VNS + VNS	78,57 %
TS + H	78,57 %
VNS + R	71,43 %
VNS/S + R	71,43 %
VNS/S + VNS	71,43 %
VNS/S + LB	64,29 %
Aireación forzada	64,29 %

Se presentan dos opciones a elegir para el diseño: estimaciones y muestreos. Las estimaciones son la opción para el usuario que no disponga de los valores reales de las características de las aguas residuales, como pueden ser: DBO₅, DQO, SST y NTK, expresados en mg/L. La herramienta estima en función de los factores de conversión y la relación de aporte per cápita, obteniendo resultados aproximados para llegar al resultado final. Como opción alternativa, se presenta el muestreo de las características de las aguas residuales donde se debe insertar manualmente los valores reales de muestreo realizados.

Luego se procede a calcular por diferentes metodologías de cálculo según el tipo de combinación que se decida. En el caso de los humedales de flujo vertical se aplica el método de «cargas aplicadas»; en el caso de los humedales de flujo horizontal, mediante el método «de P-K-C*»; para el tanque séptico el dimensionamiento es el básico que se puede encontrar en manuales de diseño de sistemas de tratamientos de aguas residuales; y para el dimensionamiento del lecho bacteriano se determina mediante el método de «la población equivalente».

Resultado final

El resultado final del proceso de selección es: área total del humedal artificial, eficiencia del sistema y las concentraciones de los parámetros seleccionados, que se expresan en m², por ciento (%) y mg/L respectivamente.

3.2. Herramienta para la selección

La herramienta está ideada para que el usuario pueda realizar un proceso de selección y evaluación mediante un proceso que tiene en cuenta sus necesidades y restricciones, y finalmente obtener el área total.

Paso 1: seleccionar las variables según la necesidad del usuario (Figura 3.3). Se tiene la posibilidad en una primera pantalla de marcar una de las tres opciones para m²/hab-eq o escribir directamente la población, y marcar el resto de las variables necesarias.

Figura 3.3. Proceso de selección.

Paso 2: decidir cuál combinación el usuario va a dimensionar (Figura 3.4). La segunda pantalla muestra el porcentaje de coincidencias después de efectuada la selección y la Figura 2.1 donde se exponen todas las tecnologías. El usuario tiene que marcar una de las tres opciones con mayor porcentaje. Se muestran las 12 variantes, aunque solo se dimensionan 11 de ellas debido a que la aireación forzada no se comprende en el presente trabajo.

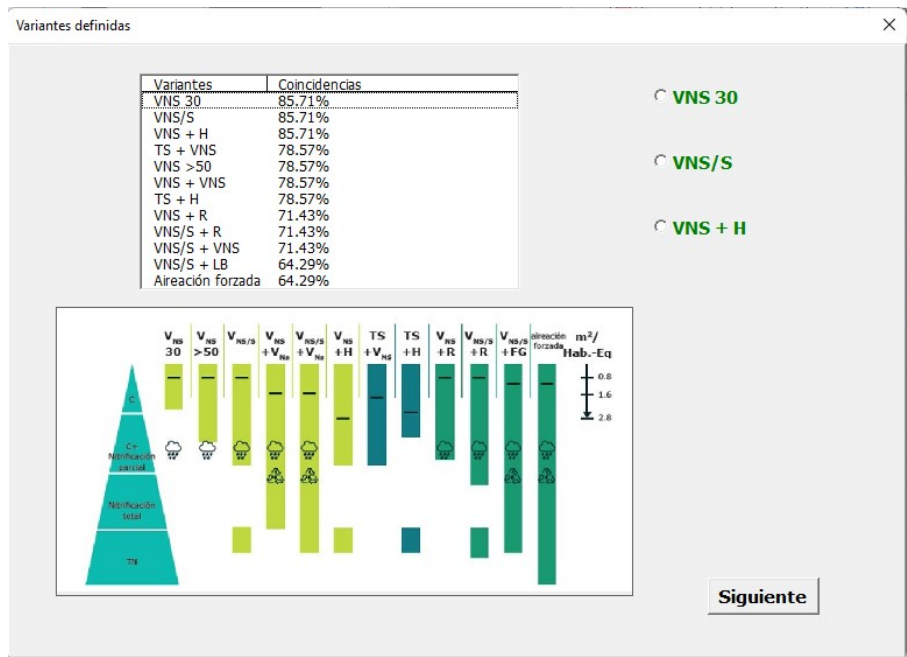


Figura 3.4. Variantes definidas.

Paso 3: insertar los parámetros de entrada. En la tercera pantalla, se inserta manualmente la población. Se puede elegir la opción de teclear los parámetros de muestreos realizados (Figura 3.5). La otra opción serían los parámetros de entrada estimados, en el caso de no disponer de los valores de muestreo (Figura 3.6).

Insertar datos

Población

Elegir una de las opciones

☐ Estimaciones ☒ Muestreos

DBO5 (mg/l)

DQO (mg/l)

SST (mg/l)

NTK (mg/l)

Calcular

Figura 3.5. Insertar datos de los muestreos realizados.

Figura 3.6. Insertar datos y la opción de las estimaciones.

Paso 4: obtención de los resultados. Se obtienen los siguientes resultados: el área total (m^2), los efluentes (mg/L) y las eficiencias (%) (Figura 3.7).

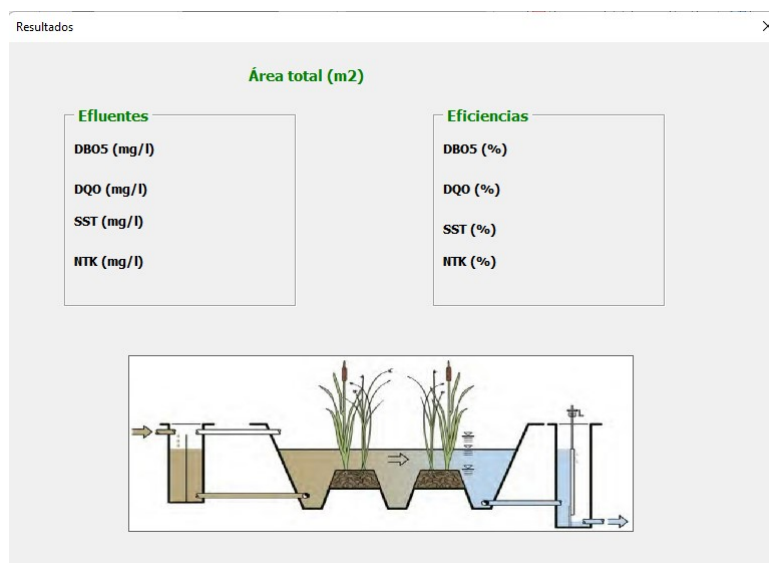


Figura 3.7. Resultados.

3.3. Funcionamiento algorítmico del proceso de selección de alternativas

En el presente algoritmo se emplean variables booleanas en los casos 2, 3, 4, 5, 6 y 7, haciendo mención a la energía eléctrica, episodios de lluvia, gestión de lodos, recirculación, reutilización de aguas residuales y tratamiento de gérmenes patógenos respectivamente. Para el caso 1 (área), un arreglo que vincula tres niveles, los cuales son: bajo, medio y alto, refiriéndose a la selección del área.

A continuación, se presenta un ejemplo del funcionamiento algorítmico del proceso de selección de las alternativas con entrada de datos siguientes: energía eléctrica, episodios de lluvias, reutilización de aguas residuales y, en cuestión del área, la opción de bajo. En cada caso de variable booleana se obtienen dos opciones. La opción SI

muestra todas las combinaciones que según el coeficiente de área seleccionado cumplen con los casos. La opción NO se refiere a las restantes combinaciones. Luego de mostrar las alternativas que responden a la selección, se determina el porcentaje de coincidencias de todas, destacando como resultados óptimos las que obtienen un 100 % de coincidencias: VNS/S+FG y A.F. (Figura 3.8).

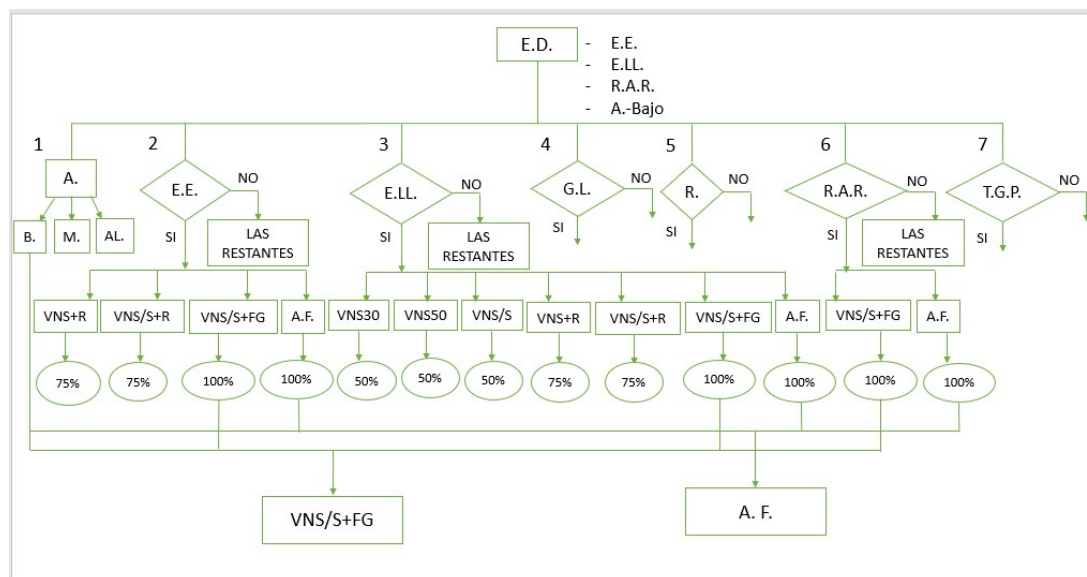


Figura 3.8. Ejemplo del funcionamiento algorítmico del proceso de selección de alternativas.

Leyenda: E.D.: Entrada de Datos. E.E.: Energía Eléctrica. E.L.L.: Episodios de Lluvia. R.A.R.: Reutilización de Aguas Residuales. A.: Área. B.: Bajo. M.: Medio. AL.: Alto. G.L.: Gestión de Lodos. R.: Recirculación. T.G.P.: Tratamiento de Gérmenes Patógenos. VNS+R: Filtro vertical no saturado + Recirculación. VNS/S+R: Filtro vertical no saturado/saturado + Recirculación. VNS/S+FG: Filtro vertical no saturado/saturado + Lecho bacteriano. A.F.: Aireación forzada. VNS30: Filtro vertical no saturado de 30 cm. VNS50: Filtro vertical no saturado mayor de 50 cm. VNS/S: Filtro vertical no saturado/saturado.

04 CONCLUSIONES

- Se definieron las variables que intervienen en el proceso de selección de cada tecnología, de tipo cualitativo y cuantitativo: uso de energía eléctrica, mantenimiento, capacidad de asimilar episodios de lluvia, tratamiento de los lodos, reutilización de aguas residuales tratadas, capacidad de remover gérmenes patógenos, área por habitante equivalente ($\text{m}^2/\text{hab-eq}$), eficiencia en cuanto a DBO_5 , DQO, SST y NTK, y costo aproximado, siendo de vital importancia para el desarrollo de la herramienta informática.
- Se desarrolla una metodología o algoritmo para la selección de la variante que cumple con el mayor porcentaje de requerimientos que solicite el especialista para el tratamiento deseado.
- Se propone una herramienta informática que ayuda a los especialistas en el tema a la selección de alternativas de humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales, teniendo en cuenta demandas y restricciones del proyecto a desarrollar.
- La herramienta propuesta contiene las metodologías de cálculo de las diferentes alternativas para su dimensionamiento.

05 REFERENCIAS

Granados, L., Montes, H., & Moctezuma, S. (2019). Humedales artificiales para el desarrollo comunitario: el caso de una comunidad Mazahua de México.

- Idris, A., Ghani, A., Yung-Tse, H., & Wang, L. K.** (2010). Wetlands for Wastewater Treatment. En *Handbook of Environmental Engineering, Volume 11: Environmental Bioengineering*.
- Inyinbor, A., Adebesein, O., Oluyori, P., Adelani-Akande, A., & Dada, O.** (2018). Water Pollution: Effects, Prevention, and Climatic Impact.
- Lombard Latune, R., & Molle, P.** (2017). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zona tropical. Guía de dimensionamiento para zonas tropicales.
- López, C.** (2016). *Evaluación de humedales artificiales a escala piloto para el tratamiento secundario de efluentes agroindustriales* [Tesis]. Universidad Zamorano, Carrera de Ambiente y Desarrollo.
- Rojas, R.** (2002). *Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales* (inf. téc.). CEPIS/OPS-OMS.
- Romero, J.** (2010). *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño* (3.ª ed.). Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sonune, A., & Ghate, R.** (2004). Developments in wastewater treatment methods. *Desalination*.
- Trapote, A.** (2013). *Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas*. Universidad de Alicante.
- Wilson, J., Asprilla, S., & Ramírez, D.** (2020). Subsurface-flow Artificial Wetlands: Comparison of Design Methodologies for the Calculation of the Surface Area based on the Removal of Organic Matter.
- Zurita, F., Belmont, M. A., De Anda, J., & White, J. R.** (2011). Seeking a way to promote the use of constructed wetlands for domestic wastewater treatment in developing countries. *Water Science & Technology*, 63(4), 654-659. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.249>

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Luis Fermín Córdova López <https://orcid.org/0000-0001-8175-6819>

Carolina Medina Losada <https://orcid.org/0009-0005-5485-8760>

Luis Alberto Rivero Cárdenas <https://orcid.org/0009-0007-6620-4515>