

# DISEÑO DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DE UN CAMPO DE PETRÓLEO COLOMBIANO

Sergio Eduardo Díaz C<sup>1</sup>., Edwin Ricardo Zamora C<sup>2</sup>., Aracelly Caselles-Osorio<sup>3</sup>, John Alexander León P.<sup>4</sup>

## RESUMEN

En el presente artículo se plantea una alternativa de solución al gran problema que enfrentan los campos de petróleo de Colombia, con respecto al manejo y disposición del agua de producción. En su mayoría, estos campos de petróleo asumen grandes costos para el tratamiento, manejo y disposición de la misma. El artículo describe el diseño de un humedal construido a escala real, propuesto como tratamiento secundario para una posible implementación de tratamiento del agua de producción.

Para el diseño se tuvieron en cuenta las características fisicoquímicas del agua afluente del campo petrolero colombiano como concentraciones de materia orgánica (DBO<sub>5</sub>) y sólidos suspendidos totales (SST), acorde con los principales criterios de diseño de la tecnología, como tipo y concentración de contaminantes, tipología de humedal, caudal de entrada y área total requerida. Una vez seleccionado el tipo de humedal, el diseño contempló las variables que afectan principalmente su desempeño, incluyendo procedimientos de operación y manejo para su implementación. El diseño consistió en un Humedal Construido de Flujo Sub-Superficial Horizontal (HC FSSH) de 120.000 m<sup>2</sup> de superficie y una profundidad de 2 ft para tratar un caudal de 678.607 Bbl/d. El HC de FSSH consistió en 60 celdas de 109,35 ft por 196,85 ft dispuestas en paralelo (12) y en serie (5), plantadas con macrófitas acuáticas nativas para potencializar los procesos de depuración. Este diseño con una gran cantidad de área superficial, se considera compensado por los bajos costos de operación y mantenimiento, calculados para un período de 10 años; Mientras que un sistema convencional de tratamiento de agua de producción en un campo petrolero, invierte 4.380.338,1 US\$ por año, un HC de FSSH opera con 23.681,78 US\$ para el mismo período de tiempo. La implementación de esta tecnología para el tratamiento de aguas residuales de la industria petrolera, se considera una alternativa viable, siempre y cuando se tengan los terrenos disponibles para su funcionamiento.

**Palabras clave:** Aguas industriales del petróleo, Tratamiento de agua de producción, Humedales construidos, Medio ambiente.

## CONSTRUCTED WETLAND DESIGN FOR PRODUCED WATER TREATMENT ON A COLOMBIAN PETROLEUM FIELD

## ABSTRACT

The development of this paper permits to find and set a new and alternative solution to the big problem that Colombian petroleum fields are facing: Management and Disposal of produced water. Due to the conventional treatment facilities, petroleum companies are spending great amounts of money to treat and dispose petroleum wastewaters. The present project describes a full-scale constructed wetland design proposed as a secondary treatment for a Colombian field produced water.

1. Ingeniero de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Colombia.

2. Ingeniero de Petróleos. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Colombia.

3. Ph. D, Docente Asociada Universidad del Atlántico. E-mail: aracellycaselles@mail.uniatlantico.edu.co

4. Ingeniero de petróleos. Docente cátedra de la Universidad Industrial de Santander, UIS. E-mail: John.leon@uis.edu.co

The design takes into account the physicochemical characteristics of a Colombian field water affluent, represented as organic matter (BOD) and Total Suspended Solids (TSS) concentrations. According to the main design criteria for the technology, like type and pollutants concentrations, type of wetland, entrance water rate and total area required. Once the type of wetland is selected, the design realizes the principal constraints that affect wetland performance, including operational and maintenance procedures for a future implementation.

The design consists in a Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland (HSSF CW) with 12 ha of superficial area and 2 ft depth, to treat an average water rate of 678.607 Bbl/day. The HSSF CW consisted on 60 cells of 109,35 x 196,85 ft each, organized in parallel (12) and in series (5). Each cell will be planted with native aquatic macrophytes to enhance purification processes. This grand superficial area design is considered compensated by the low operational and maintenance costs, calculated for a 10-year period. While a conventional treatment system for produced water needs an inversion of US\$4.380.338,1 per year, a HSSF CW works with US\$23.681,78 for the same time period.

**Keywords:** Petroleum wastewater, produced water treatment, constructed wetlands, environment.

---

## INTRODUCCIÓN

La industria del petróleo ha tenido una gran repercusión en la forma de vida actual debido a la creciente necesidad de consumos energéticos. El desarrollo tecnológico ha permitido a las empresas tener una alta dinámica de explotación con el objetivo de maximizar la producción diaria de crudo, bajo diferentes formas. Sin embargo, es de conocimiento global que la extracción de petróleo del subsuelo conlleva a una producción conjunta de gas y agua, siendo esta última la de mayor producción [1-2].

En estudios realizados en el año 2004, por cada barril de petróleo extraído del subsuelo, se extraen como mínimo 3 barriles de agua de producción (Arnold, 2004), hoy en día, por cada barril de petróleo extraído del subsuelo, se extraen como mínimo 8 barriles de agua de producción [3], con una tendencia al alza en los próximos años. Esto implica que a medida que se desarrollan los campos, el corte de agua aumentará de forma inminente, siendo necesario – en algunos casos – abandonar determinado pozo del campo por su inviabilidad económica.

Ante esta problemática, las operadoras han tenido que buscar métodos de tratamiento y disposición del agua, de manera que no afecte la rentabilidad de sus proyectos [4-8]. Dentro de los métodos más comunes para la disposición del agua de producción se encuentran la reutilización y el vertimiento a cuerpos de agua superficiales [9-11]. Como formas de reutilizar el agua se suele usar la inyección al campo para el mantenimiento de la presión, o en adición a un acuífero de una formación distante de la zona productora. Sobre los vertimientos a cuerpos de agua, cabe aclarar que las constantes regulaciones del gobierno condicionan notablemente el uso de este método para las operadoras [12].

Para acceder a estos vertimientos es necesario hacer tratamientos primarios, secundarios y terciarios al agua

de producción. Entre los sistemas de tratamiento primario se tienen los separadores trifásicos, tanques FWKO o separadores API, los cuales eliminan en su mayoría el aceite presente en el agua [13]; con el tratamiento secundario se eliminan trazas restantes de crudo, sólidos en suspensión y los iones (tanto cationes como aniones) que dan la salinidad al agua. A través del tratamiento terciario se logra la eliminación de trazas orgánicas que aún permanecieron disueltas.

Dentro de los tratamientos secundarios, los más usados corresponden a los lodos activados, filtros de lecho graduado convencionales; filtros de alta velocidad, lecho profundo y flujo ascendente y descendente; filtros de tierra diatomácea; filtros cartucho y sedimentación, entre otros (norma de calidad ambiental, 2002). Estos sistemas convencionales de tratamiento requieren altas inversiones de construcción y de O&M [14]. No obstante, los sistemas naturales como las lagunas de oxidación, las macrófitas flotantes y los humedales construidos, constituyen otra alternativa con menores costos de O&M [15-17].

Los humedales construidos (HC) han demostrado ser un sistema eficiente para el tratamiento secundario y terciario de aguas contaminadas, a partir de plantas piloto y sistemas construidos a gran escala alrededor del mundo [18-19] además de ser económicos y amigables con el medio ambiente [20]. Se definen como lechos someros impermeabilizados donde se combinan factores físicos, químicos y biológicos que permiten la depuración del agua que circula a través de ellos [21-22]. Su mayor uso ha sido para el tratamiento de aguas residuales domésticas en pequeñas poblaciones y aéreas rurales de Estados Unidos y países de Europa [23-24]. Pueden ser de flujo superficial, cuando el agua está expuesta a la atmósfera o de flujo sub superficial si el agua circula por un lecho granular sin salir a la superficie [21].

Aunque en Colombia la tecnología de humedales construidos no está consolidada, algunos sistemas operan eficientemente en el Caribe colombiano [25-26], el eje cafetero [27], el Valle del Cauca [28], Antioquia [29] y Cundinamarca [30], pero todos estos ejemplos, tratan principalmente, aguas residuales domésticas. Su uso como sistemas de tratamiento de aguas de producción en campos petroleros colombianos es aún incipiente ya que no existe información disponible sobre su aplicación y el escaso grado de conocimiento de la tecnología, bajo condiciones locales, no permite la implementación masiva de la misma. Es por eso que se requieren más estudios e investigaciones en este tipo de sistemas para su viabilidad a escala real en el país.

La implementación de la tecnología de HC en campos petroleros de Colombia es una oportunidad innovadora para que el país empiece a manejar soluciones integrales propias de países desarrollados, coherentes con los altos costos operacionales que conlleva el manejo del agua de producción. Por lo tanto, se hace necesario incursionar en el ajuste de los criterios de diseño para el funcionamiento de estos sistemas, en el tratamiento de aguas de producción de petróleo. En este sentido, el presente artículo plantea un diseño de un humedal construido, para el tratamiento secundario y terciario del agua de producción de un campo de petróleo colombiano, considerando los parámetros de diseño y el tipo de humedal adecuado sugeridos en Kadlec and Wallace (2009), Jackson & Myers (2003) y Wallace & Davis (2008).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los HC han sido ampliamente estudiados y aplicados en Estados Unidos y Europa desde principios de la década de los 70's [31-32]. Aunque la aplicabilidad de la tecnología es relativamente nueva, el concepto es antiguo, pues se sabe que las antiguas culturas como la china y la egipcia usaban los humedales naturales para la disposición de sus aguas residuales. El primer soporte científico que relacionó el uso de macrófitas acuáticas como principales agentes para tratar las aguas contaminadas, lo realizó Kathe Seidel del Instituto Max Planck, de Alemania, estudiando la posible eliminación de compuestos orgánicos [21]. Desde entonces, los HC se están aplicando de forma progresiva en todo el planeta, para atenuar el efecto contaminante de las aguas residuales domésticas e industriales.

Durante los últimos 10 años se han publicado artículos y realizado diferentes simposios que manifiestan el interés de la industria petrolera en el uso de los HC

para el tratamiento de aguas residuales en procesos que incluyen refinerías, pozos de gas y aceite o estaciones de bombeo [18]. Sus principales ventajas se centran en: (1) Altas eficiencias en la eliminación de materia orgánica y sólidos suspendidos, (2) bajos costos de operación y, especialmente, de mantenimiento; (3) bajos requerimientos energéticos; (4) tecnología relativamente sencilla, ya que no requiere personal altamente calificado; (5) usualmente, flexibles y menos susceptibles a las variaciones en la carga contaminante comparado con los sistemas de tratamiento convencional [33]. Por su parte, dentro de las desventajas principales se encuentran los grandes requerimientos de área, largos tiempos de implementación del sistema y problemas de colmatación, en el caso de humedales construidos de flujo sub-superficial.

En general, los humedales son ecosistemas someros donde interactúan agua, suelo y organismos con bajos niveles de oxígeno (anaerobiosis) y en donde la adaptación de plantas, animales y microorganismos a estas condiciones proporciona capacidades auto depuradoras para mejorar la calidad del agua [34-37]. Este complejo ecosistema sugirió su uso potencial como sistemas ingenieriles para el tratamiento de contaminantes presentes en las aguas usadas en el mundo. Así, la tecnología de HC, basada en los principios ecológicos de un humedal natural, se concibe como sistemas ingenieriles diseñados y construidos por el hombre para aprovechar las ventajas de los procesos que ocurren en los humedales naturales dentro de un ambiente controlado [38-39].

En la Figura 1 se ilustran los tipos de HC más comunes: humedales de flujo superficial (FS) [40] y de flujo sub-superficial (FSS) [41]. Los HC de FS consisten en canales poco profundos, con material granular, donde se arraiga la vegetación y por donde circula el agua en contacto con la atmósfera, permitiendo el desarrollo de plantas acuáticas flotantes, sumergidas y emergentes que favorecen mayores superficies de fijación y eliminación de microorganismos. La principal aplicación de este tipo de humedales ha sido el de restauración de ambientes y creación de zonas húmedas permitiendo el desarrollo de la flora y fauna [42]. Por su parte, los humedales de flujo sub-superficial (FSS) transportan las aguas residuales a través de un medio poroso de grava o tierra, aislando las aguas residuales del contacto con los ecosistemas de los alrededores. Éstos a su vez pueden ser de flujo vertical [43] u horizontal [44], dependiendo de la dirección de flujo.



Figura 1. Clasificación de los humedales construidos.

Para el diseño de un HC para el campo colombiano se elige un Humedal Construido de Flujo Sub-Superficial Horizontal (HC FSSH), debido a las altas eficiencias de tratamiento de materia orgánica y sólidos suspendidos (>90%), y al menor grado de exposición del personal al agua residual dado el carácter subterráneo de la misma y al a facilidad de operación comparado con los de flujo vertical que requieren periodos de llenado y vaciado para su implementación.

## CRITERIOS DE DISEÑO DE HC FSSH EN AGUAS DE PRODUCCIÓN

Los HC son diseñados de acuerdo a diversos parámetros climáticos, geológicos y logísticos. Sin embargo, el caudal a tratar y los contaminantes presentes en las aguas de producción constituyen los parámetros más importantes para el dimensionamiento de un sistema de humedales construidos [45-47].

Para el cálculo del tamaño del humedal en aguas industriales se han tenido que realizar proyectos piloto que permitan observar el comportamiento de los contaminantes y los efectos de la temperatura en el sistema. Una vez recopilados los estudios de tratamiento del piloto se suelen usar modelos de primer orden que permiten interpretar resultados, crear perfiles internos de la reducción de contaminantes dentro del sistema y realizar predicciones del desempeño del humedal, antes de implementar un sistema a escala real. Para el cálculo de este tipo de sistemas se utilizan los métodos k-C\* y P-k-C\*, propuestos en Kadlec y Knight [46] y Kadlec y Wallace [21], respectivamente.

Estos métodos son un modelo de primer orden implementado en Norteamérica, principalmente desarrollado para el cálculo del tamaño de HCFSS. Conceptualmente, el método es un modelo cuyo patrón

de flujo puede ser asemejado al de un reactor con flujo pistón (modelo k-C\*) en donde el tiempo medio de estancia de las partículas que entran al humedal, es el mismo; o una combinación de éste y un sistema de tanques en serie (modelo P-k-C\*). Este último surge como actualización al modelo k-C\* debido al indistinto comportamiento demostrado de los HC en diferentes partes del mundo.

En la ecuación 1 se muestra el modelo matemático que representa al método P-k-C\*, el cual será usado para el diseño de un HC FSSH a un campo colombiano.

$$\left(\frac{C - C^*}{C_i - C^*}\right) = \frac{1}{\left(1 + \frac{K}{Pq}\right)^P} \tag{1}$$

Donde:

- C = Concentración de salida, mg/L
- Ci = Concentración de entrada, mg/L
- C\* = Concentración en fondo, mg/L
- P = Numero aparente de TIS (Tanques en serie)
- K = Coeficiente areal de primer orden, m/d
- q = Carga hidráulica, m/d

Como se observa, la ecuación 1 es función de variables que deben ser suministradas, excepto la concentración de fondo (C\*) y el coeficiente k. La concentración de fondo es dependiente de la concentración de entrada del contaminante, mientras que el coeficiente k, como ya se mencionó, puede ser determinado a través de estudios piloto o por referencia de la literatura consultada.

Por otra parte, la ecuación (1) no demuestra claramente cómo dimensionar el humedal. En consecuencia, si la carga hidráulica es función del caudal de entrada al sistema, por unidad de área, la ecuación (2) permite expresar la ecuación (1) de otra forma, facilitando el cálculo del área superficial del humedal.

$$A = \frac{\left[\left(\frac{C_i - C^*}{C - C^*}\right)^{\frac{1}{P}} - 1\right]PQ}{K} \tag{2}$$

Donde:

- A = Área superficial, (m2).
- Ci = Concentración de entrada, (mg/L).
- C\* = Concentración de fondo, (mg/L).
- C = Concentración de salida, (mg/L).
- P = Numero aparente de tanques en serie, (adimensional).
- Q = Caudal de agua, (m3/día).
- K = Coeficiente de área de primer orden, (m/día).

Para el diseño de HCFSSH, la literatura sugiere el uso de la Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) y los Sólidos Suspendedos Totales (SST) como contaminantes principales que determinarán, junto con el caudal, el tamaño final del humedal.

## RESULTADOS

El campo de petróleo fue seleccionado teniendo en cuenta la problemática mundial actual en materia de producción de agua. El campo es operado por ECOPETROL S.A. y se encuentra en los Llanos Orientales de Colombia, bajo condiciones climáticas propias de un ambiente tropical. Por políticas de seguridad de ECOPETROL S.A. en este documento no se mencionarán datos específicos de ubicación del campo.

La producción diaria de agua del campo asciende a los 678.607 bbl/día. Actualmente presenta su pico máximo de producción de crudo, cercano a los 180.000 bbl/día, mostrando relaciones agua-petróleo de orden de 8:1, con pronósticos de 35:1 para 2018. La figura 2 muestra los panoramas de producción de crudo y agua para 2025, respectivamente.

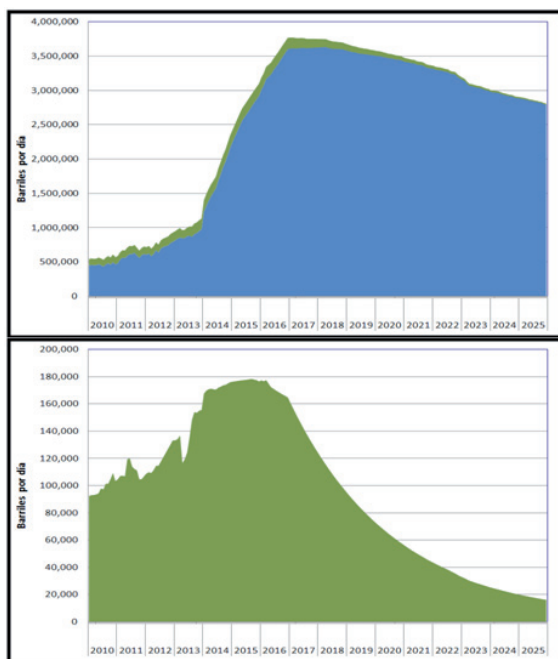


Figura 2. Panorama de producción de crudo (verde) y agua (azul) hasta el año 2025.

Las concentraciones de materia orgánica ( $DBO_5$ ) y Sólidos Suspendedos Totales (SST) del agua afluente y efluente del Sistema de Tratamiento del Agua de Producción (STAP) fueron tenidos en cuenta para la propuesta de diseño y se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Concentraciones de  $DBO_5$  y SST en ppm medidas a la entrada y salida del STAP.

Contaminante	concentración a la entrada	concentración a la salida
$DBO_5$	31 ppm	2,42 ppm
SST	44 ppm	<5 ppm

Note que las concentraciones de  $DBO_5$  y SST del agua afluente y efluente del campo petrolero son, significativamente menores de las encontradas en un agua residual doméstica o industrial [48], indicando una reevaluación de la inversión del sistema de tratamiento. No obstante, con la información suministrada, se realizó el diseño propuesto atendiendo a la necesidad de disminuir los costos de operación y mantenimiento.

El sistema convencional de tratamiento actual en el campo está compuesto por tratamientos primario, secundario y terciario, además de las facilidades necesarias para el posterior envío del agua a un cuerpo de agua receptor. Los costos totales actuales por tratamiento de aguas de producción en el campo se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Costos actuales del mantenimiento y operación del tren de tratamiento del campo petrolero.

ACTIVIDAD	CAPEX (USDS)	OPEX (USDS)	TOTAL (USDS)
Tratamiento primario	108.268.719	22.006.528	130.275.247
Tratamiento secundario	11.779.780	7.342.614	19.122.394
Tratamiento terciario	7.965.331	2.965.292	10.930.623
Disposición	25.002.427	11.488.947	36.491374
<b>COSTO TOTAL STAP</b>			<b>196.819.638</b>

Para el diseño del HC FSSH correspondiente al campo de interés, fue necesario determinar los valores de las constantes de relación (coeficiente  $k$ ) y la concentración de fondo ( $C^*$ ) tanto para  $DBO_5$  como para SST, tal como se muestran en la tabla 3.

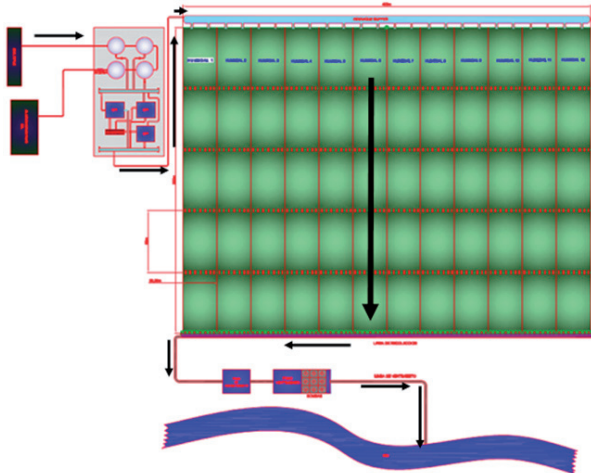
Tabla 3. Valores de  $k$  y  $C^*$  para los contaminantes seleccionados.

Parámetro	K (m/día)	$C^*$ (ppm)
$DBO_5$	0,625	5
SST	ND*	10

\*La constante de reacción para SST no estuvo disponible en la literatura revisada.



El cálculo del área superficial requerida para el sistema de humedales construidos propuesto se calculó a partir de los valores encontrados para la DBO<sub>5</sub>. En la tabla 4 se describen los criterios de diseño definidos para el humedal y en la Figura 3, se muestra la organización de las celdas del humedal para el campo colombiano.



**Figura 3.** Esquema de implementación del HCFSSH propuesto para el campo colombiano.

**Tabla 4.** Especificaciones técnicas de diseño para el humedal propuesto para el campo de petróleo colombiano.

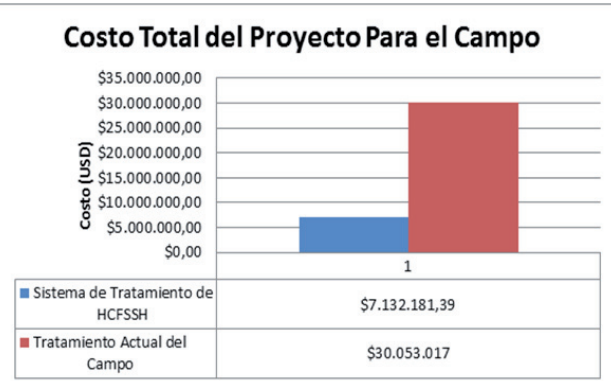
Parámetro	Selección
Configuración y disposición	12 trayectorias de flujo en paralelo, conformada cada una por 5 celdas en serie.
Dimensión total del sistema	400 m de ancho , 300 m de largo
Dimensión de cada celda	33,33 m de ancho, 60 m de largo
Numero de celdas	60
Profundidad de la celda	60 cm
Selección de plantas	<i>Eriochloa aristata</i> – <i>Eleocharis mutata</i> – <i>Cyperus articulatus</i>
Conductividad hidráulica	13.500 m/d

Así mismo, en la figura 4, se ilustran las macrófitas acuáticas nativas sugeridas y encontradas en la flora nacional, como potenciales recursos con altas capacidades de depuración de contaminantes en plantas piloto de HC desarrolladas en la región Caribe colombiana [49].



**Figura 4.** *Eriochloa aristata* (izquierda) y *Eleocharis mutata* (derecha). Plantas nativas de la región, utilizadas en humedales construidos.

De acuerdo con la figura 5, los costos de implementación y operación del sistema, superan, en gran medida, los valores obtenidos implementando un sistema natural como los HC FSSH. Los costos de inversión inicial corresponden a actividades de excavación, estudios de suelos, instalación de la vegetación y contratación de personal experto en el tema, entre otros.



**Figura 5.** Comparación de los costos totales de implementación del STAP actual y el HC FSSH propuesto.

Por su parte, los costos operacionales incluyen los requerimientos energéticos de las bombas de suministro y el mantenimiento general del humedal, ya sea por poda de la vegetación o adecuación de las bermas.

Los costos totales de tratamiento secundario y terciario, mediante la tecnología de humedales construidos, se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5.** Costos totales del humedal construido

	CAPEX (USD)	*OPEX (USD)
Costos efectivos	\$ 6.895.363,6	\$ 236.817,79
<b>TOTAL (USD)</b>	<b>\$7.132.181,39</b>	

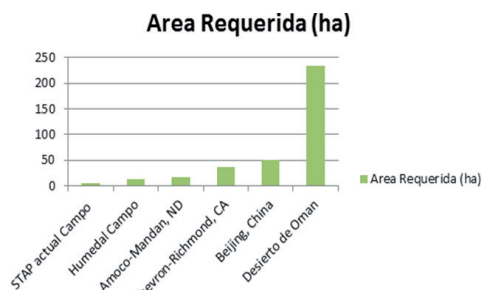
## ANÁLISIS DE RESULTADOS

El diseño de un HC FSSH realizado para un campo colombiano permitió establecer las ventajas y desventajas de la tecnología de humedales construidos [50].

En primer lugar, los costos totales de tratamiento del STAP actual son superiores a los de un sistema de tratamiento con HC, como se muestra en la figura 5. Una de las grandes ventajas de la tecnología de humedales construidos, corresponde a los bajos costos de operación y mantenimiento.

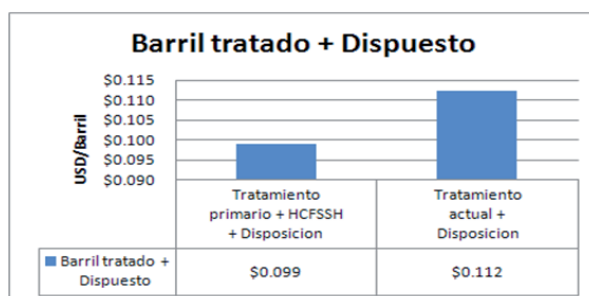
Mientras los costos de inversión, operación y mantenimiento de los equipos de tratamiento secundario y terciario del STAP actual alcanzan los US\$30.000.000, los sistemas HC necesitan únicamente alrededor de US\$7.000.000, lo que representa un 23,8% de la inversión realizada en el STAP actual.

En segundo lugar, los resultados obtenidos en el diseño del HC FSSH muestran que la implementación de este sistema requerirá un área superficial superior a 10 hectáreas, mientras que un tratamiento convencional, solo necesita 0,2 hectáreas de área total. Esto significa que, el sistema de tratamiento secundario y terciario propuesto, ocuparía unas 60 veces dicha área. Sin embargo, la relación eficiencia:superficie en HC es directamente proporcional y es característico en muchos sistemas implementados mundialmente tratar aguas residuales de la industria del petróleo (figura 6).


**Figura 6.** Requerimientos de área del STAP actual, el HC FSSH propuesto y otros HC a escala real en el mundo.

Como se puede observar, el tamaño del HC propuesto para el campo colombiano es comparable con otros diseños de humedales construidos que funcionan actualmente en Dakota del Norte y California (Estados Unidos) y en Beijing (China), donde grandes áreas de humedales depuran el agua de producción de la industria petrolera [18]. Si se revisa el humedal construido que opera en el desierto de Omán, donde se trata más de 1.000.000 de barriles por día de agua de producción, se encuentra que tiene un área de 234 hectáreas [19].

Por último, calculando los costos individuales por barril de agua, se encuentra una diferencia de 1,3 centavos de dólar, que dado el volumen diario de producción de agua, es un ahorro significativo de dinero. La figura 7 muestra los costos totales de tratamiento por barril de agua producida.


**Figura 7.** Costo de tratamiento por barril de agua producida.

En materia ambiental, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece los valores máximos permisibles de vertimiento de contaminaciones a cuerpos de agua superficiales (Apéndice 1). Ambos sistemas de tratamiento (convencional y HC FSSH) satisfacen las exigencias del ministerio, con la diferencia de que el sistema de humedales construidos lo hace a costos efectivos menores.

## CONCLUSIONES

De acuerdo al caudal vertido (678.607 barriles/día) y a la concentración de  $DBO_5$  se diseñó un sistema de humedales construidos de flujo sub superficial horizontal de aproximadamente 12 hectáreas de área superficial.

Los costos de operación y mantenimiento de un HC FSSH fueron menores (US\$ 7.132.181,39) con respecto a la inversión actual realizada en el campo petrolero colombiano (US\$ 30.053.017).

El sistema de HC FSSH propuesto permite alcanzar eficiencias de depuración coherentes con los estándares ambientales y legales vigentes. Igualmente, facilita la

utilización de plantas acuáticas nativas como estrategia de conservación y optimización de la biodiversidad colombiana.

## RECOMENDACIONES

- Evaluar la implementación de un HC FSSH como tratamiento secundario y terciario del agua de producción, ya que se podría reducir los costos de operación en un 97,7%.
- Revisar los costos del tren de tratamiento actual del campo petrolero, basados en bajas concentraciones de materia orgánica y sólidos suspendidos reportados.
- Reducir el área superficial requerida del HC FSSH mediante una nueva propuesta que combine un humedal construido de flujo sub-superficial horizontal junto con un humedal de flujo superficial.
- Realizar un proyecto piloto que permita observar el comportamiento del sistema a escala de laboratorio y así obtener información precisa, para estudiar la viabilidad ante una posible implementación a escala real.

## AGRADECIMIENTOS

A la doctora Aracelly Caselles Osorio, docente asociada de la Universidad del Atlántico, por aportar su experiencia y colaboración en el desarrollo de la temática relacionada con los sistemas de humedales construidos en Colombia.

Al Ingeniero John Alexander León Pabon, por apoyar el desarrollo de la investigación que termino en la publicación del presente estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

1. W.J. GEORGIE, PRIMAS (Oil & Gas) Consultancy; D. Sell, Cordah Limited; M.J. Baker, University of Aberdeen. Produced Water Volume Estimates and Management Practices. 2011.
2. ARNOLD, R., BURNETT, D.B., ELPICK, J., FEELEY, T.J., GALBRUN, M., HIGHTOWER, M., JIANG, Z., KHAN, M., LAVERY, M., LUFFEY, F. & VERBEEK, P. Managing water. Schlumberger. En: Schlumberger. En: <http://www.slb.com/~/>media/Files/resources/oilfield\_review/ors04/sum04/04\_managing\_water.pdf.[citado en 2004].
3. ECOPETROL S.A 2012.
4. LAWRENCE, A.W., MILLER, J.A., MILLER, D.L., Remediation Technologies Inc.; LINZ, D.G., Gas Research Inst. An Evaluation of Produced Water Management options in the Natural Gas Production Industry. 1993.
5. LARS H. H., Maersk Oil. Produced Water Management in Mature Field Operation. 2009.
6. Y. DU, New Mexico Tech; L. GUAN, Texas; H. LIANG, China Petroleum University. Advances of Produced Water Management. 2005.
7. P. EVANS, K. ROBINSON, Oil Plus Limited Produced Water Management. Reservoir and Facilities Engineering Aspects. 1999.
8. E.D. WALLACE, Alberta Research Council; J. ZHOU, Alberta Research Council; C. MATTHEWS, C-FER Technologies Limited; E. HOFFMAN, Consultant. WATER MANAGEMENT IN THE OIL PRODUCTION INDUSTRY. 2000.
9. ARNOLD, K. & STEWART, M. Surface Production Operations. 3 ed. Houston: ELSEVIER, 2008.
10. MONTES, E. Tecnologías de Tratamiento de Emulsiones en Campos Petroleros. Tesis de Especialización. 2010.
11. Asociación Regional de Empresas del sector Petróleo, gas y biocombustibles en Latinoamérica y el Caribe. ARPEL. Disposición y tratamiento del agua producida. 1992.
12. Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. Decreto 4728 de 2010. En: <http://www.minambiente.gov.co>. [Revisión 5.0, Octubre, 2012].
13. JACKSON, L.M. y MYERS, J.E. Design and Construction of Pilot Wetlands for Produced-Water Treatment. SPE 84587-MS. 5-8 Octubre 2003. En: Onepetro [base de datos en línea].
14. M.G. PUDER, Loyola University, and J.A. VEIL, SPE, Argonne National Laboratory. Options, Methods, and Costs for Offsite Commercial Disposal of Exploration and Production Wastes. 2007.



15. REED, S.C., CRITES, R.W., MIDDLEBROOKS, E.J. *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. 2 ed. McGraw-Hill, 1995.
16. J. E. MYERS, *Texaco Worldwide Exploration and Production SH&E. Constructed Wetland Overview for the Petroleum Industry*. 2000.
17. P. E. EKE, SPE; M. SCHOLZ, Institute for Infrastructure and Environment, School of Engineering and Electronics, The University of Edinburgh; S. D. WALLACE, North American Wetland Engineering, White Bear Lake, Minnesota *Constructed Treatment Wetlands: Innovative Technology for Petroleum Industry*. 2007.
18. KADLEC, R.H. y KNIGHT, R.L. *The Use of Treatment Wetlands for Petroleum Industry Effluents*. En: *Environmental Science & Technology*. 1999. Vol.33, no.7.
19. NIMR, B., BREUER, R.S. Y SCHLICHT, T. *Produced water management using wetlands: A progress report on the installation of the first commercial wetland application in the oil and gas industry*. SPE 140239-MS. 21-23 Marzo 2011. En: *Onepetro* [base de datos en línea].
20. VYMAZAL, J. y KRÖPFELOVÁ, L. *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow*. *Environmental pollution*. Vol. 14. 2008.
21. KADLEC, R.H. y WALLACE, S.D. *Treatment Wetlands*. 2 ed. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2009.
22. A. CASELLES OSORIO, J. GARCIA. *Performance of experimental horizontal subsurface flow constructed wetlands fed with dissolved or particulate organic matter*. 2006.
23. VYMAZAL, J. *The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater*. *Ecological Engineering* 35. 2009.
24. R. L. Knight, V. W. E PAYNE Jr., R. E. BORER. R. A. CLARKE Jr., J. H. PRIES. *Constructed wetlands for livestock wastewater management*. 2000.
25. DEL RIO, P. y RAMOS, Y. *Acondicionamiento del agua residual industrial de los procesos de galvanización y decapado previo al tratamiento en humedales construidos*. *Acerías de Colombia – Acesco& Cía. S.C.A.* En: *Panamerican conference on wetland systems for wáter quality improvement, management and treatment Universidad Tecnologica de Pereira – Environmental Sciences Faculty*. 2012.
26. LANCHEROS, J.; MOSQUERA, J. y CASELLES OSORIO, A. *Aspectos hidráulicos de un humedal construido de flujo sub-superficial horizontal y su relación con la eficiencia de eliminación en zona rural de Santa Marta (Colombia)*. En: “*Sociedad y servicios ecosistémicos: perspectivas desde la gestión del agua, las inundaciones y el saneamiento sostenible*”. Universidad del Valle. Cali –Colombia. 2012.
27. PAREDES, D. y GARCÍA, J. A. *Desempeño de la combinación tratamiento anaerobio, humedal vertical y humedal horizontal para el tratamiento de aguas residuales domésticas - Caso Magnetron S.A.* En: *Panamerican conference on wetland systems for wáter quality improvement, management and treatment Universidad Tecnologica de Pereira – Environmental Sciences Faculty 26th February - 1st of March 2012*.
28. AUSCUNTAR, D. R., TORO, A.F., PEÑA, M.R., MADERA, C.A. *Changes of flow patterns in a horizontal subsurface flow constructed wetland treating domestic wastewater in tropical regions*. *Ecological engineering* 35. 2009.
29. AGUDELO, R., MACHADO, C., AGUIRRE, N., MORATÓ, J. & PEÑUELA, G. *Optimal conditions for chlorpyrifos and dissolved organic carbon removal in subsurface flow constructed wetlands*. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2011.
30. LARA, J. y VERA, I. *Implantación y Evolución de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial en Cagua, Cundinamarca*. *Ingeniería y Universidad*. 2005.
31. JANET S., DUNBABIN, KATHLEEN H. BOWMER. *Potential use of constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters containing metals*. 1992.
32. R. HABERL, R. PERFLER, H. MAYER. *Constructed wetlands in Europe*. 1994.
33. MOSHIRI, G.A. *Constructed Wetlands for Water*

- Quality Improvement. Lewis Publishers. Florida. 1993.
34. H. BRIX. FUNCTIONS OF MACROPHYTES IN CONSTRUCTED WETLANDS. 1994.
35. C. C. TANNER. Plants for constructed wetland treatment systems. A comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. 1996.
36. U. STOTTMEISTER, A. WIEßNER, P. KUSCHK, U. KAPPELMEYER, M. KÄSTNER, O. BEDERSKI, R.A. MÜLLER, H. MOORMANN. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. 2003.
37. J. P. GIBBS. Importance of small wetlands for the persistence of local populations of wetland-associated animals. 1993.
38. G KENNEDY, T MAYER. Natural and constructed wetlands in Canada: An overview. Water Quality Research Journal of Canada, 2002.
39. B GOPAL. Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: Potentials and problems. Water Science and Technology, 1999.
40. R. H. KADLEC. Overview: Surface flow constructed wetlands. 1995.
41. SC REED, D BROWN. Subsurface flow wetlands: a performance evaluation. Water environment research, 1995.
42. WANG, L.K., et al. Environmental Bioengineering. Handbook of environmental engineering. Vol. 11. Humana Press. 2010.
43. ARIAS and BRIX. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. 2005.
44. J. VYMAZAL. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. 2005.
45. RONALD W. CRITES, G. TCHOBANOGLIOUS. Small and decentralized wastewater management systems. WCB/McGraw-Hill, 2/04/1998.
46. KADLEC, R.H. y KNIGHT, R.L. Treatment Wetlands, 1 ed. Lewis Publishers, 1996.
47. USEPA. Design Manual Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment. 1988.
48. B. M. DAVIS, SPE AND S. D. WALLACE, STANTEC; AND R. WILSON, BP. Pilot-Scale Engineered Wetland Design for Produced Water Treatment. 2009.
49. CASELLES-OSORIO, A., VILLAFANE, P., CABALLERO, V. y MANZANO, Y. Efficiency of mesocosm-scale constructed wetland systems for treatment of sanitary wastewater under tropical conditions. En: Water, Air & Soil Pollution journal. 2011. Vol. 7, p. 11-13.
50. USEPA. Evaluating functions and benefits of constructed wetlands. Economic Benefits of Wetlands . 2006.

---

**Recepción:** 29 de Agosto de 2013  
**Aceptación:** 19 de Diciembre de 2013

**Apéndice 1.** Valores máximos permisibles para disposición a cuerpos de agua superficial.

PARÁMETRO	VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES	
	CUERPO DE AGUA SUPERFICIAL	ALCANTARILLADO PÚBLICO
<b>Generales</b>		
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	400,0	600,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	200,0	300,0
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	180,0	200,0
Sólidos Sedimentables (SSED)	5,0	10,0
Grasas y Aceites	50,0	50,0
Fenoles	0,2	0,2
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	15,0	15,0
<b>Hidrocarburos</b>		
Hidrocarburos Totales(HTP)	10,0	10,0
<b>Nutrientes</b>		
Fósforo Total (P)	2,0	4,0
<b>Compuestos Nitrogenados</b>		
Nitrógeno Total (N)	40,0	40,0
<b>Iones</b>		
Cianuro (CN <sup>-</sup> )	0,5	1,0
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	1.200,0	1.200,0
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	300,0	500,0
Sulfuros (S <sup>2-</sup> )	2,0	3,0

**Fuente.** Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. Decreto 4728 de 2010. [Revisión 5.0, octubre, 2012]