

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

**SERGIO EDUARDO DÍAZ CASELLES
EDWIN RICARDO ZAMORA CARRANZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

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

**SERGIO EDUARDO DÍAZ CASELLES
EDWIN RICARDO ZAMORA CARRANZA**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos

**ING. JOHN ALEXANDER LEÓN PABÓN
Director**

**Ph D. ARACELLY CASELLES OSORIO
Codirector**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

Quiero dedicar este libro que es prueba del presente logro, primero a Dios por demostrarme que tanto las cosas buenas como las malas tienen un fin en esta vida y todas las decisiones tomadas serán por un bien futuro. Además quiero dedicárselo especialmente a mis padres que siempre han confiado en mí, a pesar de las decisiones no tan buenas que haya tomado en el pasado, al igual les doy gracias por darme la oportunidad de luchar por mis metas, brindándome todo lo que me han podido brindar con tanto esfuerzo y amor, gracias por darme todo el amor que me han dado. A mi abuela María que aunque tal vez ya no lo recuerde ella solía decirme que lo que más deseaba era verme como todo un profesional, te quiero mucho.

A mis hermanos Wendy, Alexa, Jenny y Jhon, por ser mi familia, por darme el cariño que me han dado en toda mi vida. Quiero agradecer especialmente a Yiris, que ha sido una persona muy especial en últimos años de carrera, gracias por apoyarme en todo momento en la lucha de esta meta, ella más que nadie sabe todo lo que tuve que pasar para poder lograrlo. A toda mi familia por alentarme en todos estos años, especialmente a mis tíos Andrés, Gladis y Cecilia, y a mis primos Oscar y Yesid.

Agradezco a mis amigos de la universidad, Alejandro, con quien compartí muchos momentos alegres y tristes que fortalecieron nuestra amistad, convirtiéndolo en uno de mis mejores amigos, que aunque un poco distraído y a veces “dejado” frente a las cosas, sé que siempre podré contar con él, a Felipe que ha demostrado estar entre mis mejores amigos con la solidaridad y dedicación que solo puede brindar un amigo, a Leonardo por brindarme su amistad, a Sergio mi compañero y amigo de tesis, quien así como su mamá lo dice, los compañeros de tesis nunca se olvidan, a Angie por su sincera amistad y por prestarnos el Wii, a Nury, Claudia, Suca y Adriana por ser buenos amigos en este tiempo, también agradezco a la familia Alarcón por recibirnos en su núcleo como si fuéramos hijos adoptados.

Por último pero no menos importante quiero agradecer al ingeniero John León y a la doctora Aracelly Caselles, quienes fueron los directores de la tesis, por su tiempo y dedicación en el apoyo para la realización de este libro. Además agradezco a todas las personas que no mencione en este escrito, pero que de alguna manera han sido parte de estos años de vida universitaria en los que me he formado como la persona y profesional que soy ahora.

Edwín Ricardo Zamora Carranza

DEDICATORIA

A Dios, quien con su infinita gracia me dio la oportunidad de estudiar, y eligió para mí una familia llena de amor y principios, los cuales se ven reflejados en este logro.

A mis padres, Ricardo y Nivia, que son todo para mí y con su paciencia y constancia se encargaron de educarme y rodearme en una familia a la que estaré agradecido de pertenecer por siempre. Los amo muchísimo.

A mi hermano Ricardo Andrés, mi compañero de vida y mejor amigo. Con quien he compartido y compartiré las mejores experiencias de la vida.

A María Alejandra, por acompañarme en los momentos buenos y malos de esta fase final de una etapa de mi vida que recordare por siempre. Muchas gracias preciosa!!

A mis compañeros y colegas de oficio, Byron, jorginho, los tocallos, alejo, leo, clau, Adri!, pipe, nurycini y muchos más! Que de una forma u otra hicieron esto posible. Y obviamente al viejo Richard, compañero en esta lucha que hoy termina.

Finalmente, a todos aquellos que, desde aquel Abril de 2008, compartieron experiencias que son parte de mi vida y mi formación en el Alma Mater: la selección de futbol, Leidy, Yehira, Angie (the weather gal! Lol), la manada de primos que tengo, muchas gracias a todos!!!

Sergio Eduardo

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primero a Dios por su gran misericordia y por guiarnos día a día en la dirección de nuestras metas.

A la doctora Aracelly Caselles Osorio, docente asociada a 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.

A nuestros compañeros de estudio que nos apoyaron, a los docentes que nos brindaron sus conocimientos en pro de nuestro progreso, a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería de Petróleos que nos permitieron formarnos como profesionales.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. FUNDAMENTOS DE AGUAS DE PRODUCCIÓN EN CAMPOS PETROLEROS	
23	
1.1 CONTAMINACIÓN DE FUENTES DE AGUA.....	23
1.2 VOLUMEN DE AGUA PRODUCIDA.....	23
1.3 SALES Y SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN.....	24
1.4 MÉTODOS COMUNES DE MANEJO Y DISPOSICIÓN DEL AGUA DE PRODUCCIÓN	25
1.4.1 Descarga Costa Afuera.....	26
1.4.2 Evaporación en campo abierto.	26
1.4.3 Disposición en Pozos de Poca Profundidad.	27
1.4.4 Descarga Controlada en agua dulce.....	28
1.5 TRATAMIENTOS PRELIMINARES REQUERIDOS ANTES DE LA DISPOSICIÓN	29
1.5.1 Deshidratadores Mecánicos y Separadores de Tres Fases.....	30
1.5.2 Tratadores.....	30
1.5.3 Remoción de Petróleo Disperso	30
1.5.4 Eliminación de Gas Disuelto	31
1.5.5 Eliminación de Sólidos en Suspensión	32
1.5.6 Biocidas	32
1.6 NORMATIVA AMBIENTAL NACIONAL E INTERNACIONAL.....	33
2. HUMEDALES CONSTRUIDOS (HC): TECNOLOGÍA NATURAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	35
2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LOS HC	35
2.2 TIPOS DE HC	36
2.3 HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUPERFICIAL.....	37
2.4 HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL	38
2.4.1 Humedales construidos de flujo sub-superficial horizontal (HCFSSH).	39

2.4.2 Humedales construidos de flujo sub-superficial vertical (HCFSSV)	40
2.4.3 Sistemas Combinados	40
2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS HC	41
2.6 PRINCIPALES COMPONENTES DE LOS HC	42
2.6.1 El Suelo.....	42
2.6.2 Vegetación.....	43
2.6.3 Microorganismos.....	44
2.7 MECANISMOS DE ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES	44
2.7.1 Sólidos en Suspensión	45
2.7.2 Materia Orgánica	46
2.7.3 Nitrógeno	46
2.7.4 Fosforo.....	47
2.8 FUNCIONAMIENTO DE LOS HC	48
2.9 ESTADO DEL ARTE Y NECESIDADES ESPECÍFICAS DE LA INDUSTRIA PETROLERA	48
3. DISEÑO	54
3.1 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	54
3.1.1 Área requerida.....	55
3.1.2 Geología y suelos.....	55
3.1.3 Agua de formación.....	55
3.1.4 Altitud.....	56
3.1.5 Condiciones biológicas.....	56
3.1.6 Caracterización de aguas de la industria petrolera.....	56
3.2 OBJETIVOS DEL TRATAMIENTO	56
3.3 OTROS PARÁMETROS DE DISEÑO	58
3.4 CLIMA E HIDROLOGÍA	59
3.4.1 Filtración	60
3.4.2 Temperatura	61
3.5 SELECCIÓN DE TIPO DE HUMEDAL	61
3.5.1 Sistema Natural o Ingenieril.....	61

3.5.2 HCFS o HCFSS?	63
3.6 PRE Y POST-TRATAMIENTO.....	64
3.6.1 Pre-tratamiento.	65
3.6.2 Post-tratamiento.....	66
4. DISEÑO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL (HCFSS)	68
4.1 CÁLCULO DEL TAMAÑO DEL HUMEDAL	68
4.1.1 Método P-k-C* aplicado a HCFSSH	70
4.1.1.1 Establecer las condiciones de entrada al humedal (afluente).....	70
4.1.1.2 Establecer las condiciones de salida del humedal (efluente).....	71
4.1.1.3 Establecer el caudal de entrada y la filtración al subsuelo.....	71
4.1.1.4 Determinar los valores de precipitación y evapotranspiración de la zona de influencia del humedal	71
4.1.1.5 Seleccionar el valor de k para el/los parámetro(s) seleccionado(s)	72
4.1.1.6 Seleccionar el valor-P (TIS).	73
4.1.1.7 Seleccionar los parámetros C* para los parámetros específicos.	73
4.1.2 Método P-k-C* aplicado a HCFSSV.....	74
4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	75
4.2.1 Diseño físico.	76
4.2.1.1 Accesos.	76
4.2.1.2 Pendientes.	76
4.2.1.3 Sistemas de tratamiento existentes.	77
4.2.1.4 Configuración y Disposición.....	77
4.2.1.5 Colmatación.	79
4.2.1.6 Configuración de las celdas.....	82
4.2.1.7 Hidráulica de HCFSS.....	84

4.2.1.8 Distribución y mantenimiento del flujo.....	86
4.2.1.9 Membranas de Impermeabilización.	89
4.2.2 Construcción.....	90
4.2.2.1 Elevación.	91
4.2.2.2 Instalación de Membranas.....	92
4.2.2.3 Berma.	93
4.2.2.4 Paredes laterales	93
4.2.2.5 Instalación de estructuras de control.	94
4.2.3 Plantación y puesta en marcha.....	95
5. CAMPO COLOMBIANO	98
5.1 INFORMACIÓN DEL CAMPO COLOMBIANO	98
5.1.1 Petróleo.....	99
5.1.2 Agua de producción.	101
5.1.3 Sistema de tratamiento de agua producida (STAP).....	101
5.1.4 Cálculos económicos.	106
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	112
6.1 DISEÑO DEL HCFSSH PROPUESTO PARA EL CAMPO COLOMBIANO...	112
6.2 MANEJO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	120
6.3 CÁLCULOS ECONÓMICOS.....	125
6.3.1 CAPEX.....	126
6.3.2 OPEX.....	131
6.4 APRECIACIONES GENERALES.....	132
6.5 AGUA DE PRODUCCIÓN Y CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVA AMBIENTAL.....	137
7. CONCLUSIONES	138
8. RECOMENDACIONES.....	139
BIBLIOGRAFÍA.....	141

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Clasificación de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales según régimen de flujo de agua y tipo de crecimiento de plantas	37
Figura 2. Elementos básicos de un humedal de flujo superficial	38
Figura 3. Representación de un humedal construido de flujo sub-superficial horizontal.	39
Figura 4. Esquema del comportamiento de un reactor de flujo en pistón para predecir el transporte de partículas y el rendimiento en la eliminación de contaminantes.....	70
Figura 5. Disposición típica de un humedal construido de FV	74
Figura 6. Etapas de colmatación en lechos de humedales de FSSH	81
Figura 7. HCFSSV con un arreglo de tuberías perforadas con juntas rotatorias para distribución de flujo en Middlebury, Indiana. 2011	87
Figura 8. Cámara de infiltración en la entrada de un HCFSSH en Alfes, Cataluña.	88
Figura 9. HCFSSV para tratar agua de producción, en etapa de construcción en Buffalo, Nueva York, USA.....	91
Figura 10. Planta piloto para depurar agua residual de una familia de 7 personas en zona rural de Santa Marta, Colombia	94
Figura 11. Unidad de control de nivel de agua en un HCFSSH en Almatret Nord, Cataluña.	95
Figura 12. <i>Eriochloa aristata</i> (izquierda) y <i>Eleocharis mutata</i> (derecha) en una planta piloto en la universidad del Atlántico, Barranquilla.	96
Figura 13. Ubicación geográfica del campo.....	99
Figura 14. Pronóstico de producción de aceite según el plan de desarrollo propuesto.....	100

Figura 15. Relación agua-petróleo esperada en los próximos 15 años.	100
Figura 16. Unidades CIP del campo, 80.000 BPD/CU	102
Figura 17. Celdas de flotación campo, 120.000 BPD/CU	103
Figura 18. Filtros del campo, 50.000 BPD/CU	103
Figura 19. Piscina de aspersión del campo.	104
Figura 20. Piscina de estabilización, campo.	105
Figura 21. Esquema de la piscina de estabilización del campo.	105
Figura 22. Bombas de vertimiento campo. 132.000 BLS/Prom. CU	106
Figura 23. Costos generados por el tratamiento del agua de producción en el campo.	109
Figura 24. Costos CAPEX-OPEX de disposición final.	110
Figura 25. Costo de tratamiento y disposición por barril de agua tratado	111
Figura 26. Esquema del HCFSSH propuesto para el campo colombiano.	120
Figura 27. Cultivo de maíz implementado en un HCFSSV en zona rural de Middlebury, Indiana. 2011	124
Figura 28. A, lecho granular colmatado; B, extracción de un lecho colmatado. Aliceville, USA.....	125
Figura 29. Áreas requeridas para el diseño de diferentes humedales construidos en el mundo comparadas con la requerida para el campo colombiano.	134
Figura 30. Costo Total de los dos sistemas propuestos para el campo.....	135
Figura 31. Costo total en dólares por barril tratado en cada sistema de tratamiento propuesto.....	136

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principales efectos y concentraciones de los contaminantes frecuentes en agua de producción de un campo petrolero.....	24
Tabla 2. Valores límites máximos permisibles en mg/L para descargas a agua superficial y alcantarillados	28
Tabla 3. Normativa Ambiental en Distintos Países de América.	33
Tabla 4. Ejemplos de humedales construidos de la industria petrolera a gran escala y piloto para el tratamiento de agua de producción en diferentes partes del mundo.....	49
Tabla 5. Concentraciones promedio y eficiencia (%) de eliminación de materia orgánica de humedales construidos usados para tratar aguas industriales.....	51
Tabla 6. Concentraciones promedio y eficiencias de eliminación (%) de sólidos suspendidos totales y fosforo en aguas residuales de la industria de petróleo tratada con humedales construidos	52
Tabla 7. Concentración de fondo C*, basado en la concentración de entrada de DBO.....	73
Tabla 8. Muestra de valores obtenidos de entrada y salida del Sistema de Tratamiento del Agua de Producción (STAP).	101
Tabla 9. Métodos de tratamiento en el campo.....	108
Tabla 10. Costo general del Sistema de Tratamiento del Agua de Producción del campo colombiano.....	110
Tabla 11. Valores de los parámetros necesarios para el cálculo del Área del Humedal.	113
Tabla 12. Área requerida para el humedal de acuerdo con las concentraciones de entrada de DBO ₅	115
Tabla 13. Parámetros de diseño recomendados para un sistema de HCFSSH en el campo colombiano.....	117

Tabla 14. Resumen detallado de los parámetros de diseño de un HCFSSH para el campo colombiano.....118

Tabla 15. Costo total estimado CAPEX para el campo colombiano.130

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA DE PRODUCCIÓN DE UN CAMPO DE PETRÓLEO COLOMBIANO*

AUTORES: SERGIO EDUARDO DÍAZ CASELLES**

EDWIN RICARDO ZAMORA CARRANZA**

PALABRAS CLAVES: Aguas industriales del petróleo, Tratamiento de agua de producción, Humedales construidos, Medio ambiente.

DESCRIPCIÓN:

Con el desarrollo de este proyecto, se buscó plantear una alternativa de solución al gran problema que enfrentan los campos de petróleo de Colombia con el manejo y disposición del agua de producción, ya que en su mayoría deben asumir grandes costos para el tratamiento, manejo y disposición de la misma. El proyecto 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 afluyente del campo petrolero colombiano como concentraciones de materia orgánica (DBO_5) 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^2 de superficie y una profundidad de 0.6 m para tratar un caudal de $107.890 \text{ m}^3/\text{d}$. El HC de FSSH consistió en 60 celdas de 33.33m por 60 m dispuestas en paralelo (12) y en serie (5). Cada celda será plantada con macrófitas acuáticas nativas para potencializar los procesos de depuración. Este diseño de área superficial considerable, se considera compensado por los bajos costos de operación y manteniendo calculados para un período de 10 años. Mientras que un sistema convencional de tratamiento de agua de producción en un campo petrolero, invierte $4.380.338,1 \text{ US\$}$ por año, un HC de FSSH opera con $23.681,78 \text{ US\$}$ 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.

* Proyecto de grado.

**Facultad de Ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: ING. John Alexander León Pabón. Codirector: Ph D. AracellyCaselles Osorio.

ABSTRACT

TITLE: CONSTRUCTED WETLAND DESIGN FOR PRODUCED WATER TREATMENT ON A COLOMBIAN PETROLEUM FIELD*

AUTHORS: SERGIO EDUARDO DÍAZ CASELLES**

EDWIN RICARDO ZAMORA CARRANZA**

KEY WORDS: Petroleum wastewater, produced water treatment, constructed wetlands, environment.

DESCRIPTION:

The development of this project 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.

The design takes into account the physicochemical characteristics of a Colombian field 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 0,6 m depth, to treat an average water rate of 107.890 m³/day. The HSSF CW consisted on 60 cells of 60 x 33,33 m 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.

* Degree project.

** Physicochemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Director: ING. John Alexander Leon Pabón. Codirector: Ph D. Aracelly Caselles Osorio.

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 producción¹.

Actualmente, por cada barril de petróleo extraído del subsuelo, se producen como mínimo 3 barriles de agua residual². Esto implica que a medida que se desarrollan los campos, el corte de agua aumenta 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 disposición y eliminación del agua, de manera que no afecte la rentabilidad de sus proyectos. 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. Como una forma de reutilizar el agua, se suele usar la inyección al yacimiento 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 operadoras³.

¹ R. Arnold, et al. 2004. Managing water. Schlumberger. En: _____ Schlumberger. En: http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors04/sum04/04_managing_water.pdf.

² Ibid.

³ Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. Decreto 4728 de 2010. En: <http://www.minambiente.gov.co>. [revisión 5.0. Octubre, 2012].

Para acceder a estos vertimientos es necesario hacer tratamientos primarios, secundarios y terciarios al agua de producción. Con el tratamiento primario se extraen en su mayoría los componentes orgánicos – como los hidrocarburos – que están presentes en el agua; con el tratamiento secundario se eliminan los 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 disueltas⁴.

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 otros⁵. Estos sistemas convencionales de tratamiento requieren altas inversiones de construcción y de O&M. 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&M⁶.

Los humedales construidos (HC) por ejemplo, han demostrado ser un sistema eficiente para el tratamiento secundario y terciario de aguas contaminadas, además de ser económicos y amigables con el medio ambiente⁷. 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 ellos⁸. Su mayor uso ha sido para el tratamiento de aguas residuales domesticas en pequeñas poblaciones y áreas rurales de Estados Unidos y países de Europa^{9,10}. Pueden ser de flujo superficial, cuando el agua está expuesta a la

⁴NIJHAWAN, N y MYERS, J. E. Constructed treatment wetlands for the treatment and reuse of produced water in dry climates. SPE 98567-MS. 2-4 Abril 2006. En: Onepetro.

⁵Norma de calidad ambiental y de descarga de efluente: recurso agua. 2002. En: <http://cdam.minam.gob.pe/publielectro/calidad%20ambiental/normasrecursoagua.pdf>.

⁶ REED, S. C., et al. Natural Systems for Waste Management and Treatment. 2 ed. McGraw-Hill, 1995.

⁷VYMAZAL, J. y KRÖPFELOVÁ, L. Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow. Environmental pollution. Vol. 14. 2008.

⁸KADLEC, R.H. y WALLACE, S.D. Treatment Wetlands. 2 ed. CRC Press, Boca Ratón, Florida, 2009.

⁹VYMAZAL Y KRÖPFELOVÁ, Op.cit.

atmosfera o de flujo sub superficial si el agua circula por un lecho granular sin salir a la superficie¹¹.

Aunque en Colombia la tecnología de humedales construidos no está consolidada, algunos sistemas operan eficientemente en el Caribe colombiano¹², Valle del Cauca¹³ y Antioquia¹⁴, entre otros. Pero todos estos ejemplos tratan, principalmente, aguas residuales domésticas. Su uso como sistemas de tratamiento de aguas de producción en campos petroleros es aún incipiente. La implementación de la tecnología de HC en campos petroleros de Colombia es una oportunidad innovadora para incursionar en el manejo de soluciones integrales propias de países desarrollados, coherentes con los altos costos operacionales que conlleva el manejo del agua de producción. Por tanto, se hace necesario ajustar criterios de diseño para el funcionamiento de estos sistemas, en el tratamiento de aguas de producción de petróleo. En este sentido, el presente proyecto, pretende plantear un diseño de un humedal construido, para el tratamiento del agua de producción de un campo de petróleo colombiano considerando los parámetros de diseño y el tipo de humedal adecuado sugeridos por varios expertos (Kadlec and Wallace, 2009; Jackson & Myers, 2003 y Wallace & Davis, 2008).

¹⁰KADLEC, Op.cit

¹¹KADLEC, R. H. Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. *Ecological Engineering* 23. 2009.

¹² LANCHEROS, J.; MOSQUERA, J. y CASELLES, 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.

¹³AUSCUNTAR, D. R., et al. Changes of flow patterns in a horizontal subsurface flow constructed wetland treating domestic wastewater in tropical regions. *Ecological engineering* 35 274–280. 2009

¹⁴AGUDELO, R., et al. Optimal conditions for chlorpyrifos and dissolved organic carbon removal in subsurface flow constructed wetlands. En: *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2011.

1. FUNDAMENTOS DE AGUAS DE PRODUCCIÓN EN CAMPOS PETROLEROS

El agua de producción, por lo general, es relativamente clara y difícil de distinguir de cualquier otro tipo de agua natural. Sin embargo, las cantidades variables de sales y gases (CO, CO₂, H₂S), así como sólidos suspendidos incluyendo trazas de metales pesados y altos niveles de estroncio y radio, las convierten en aguas no aptas para el consumo humano o agricultura.

1.1 CONTAMINACIÓN DE FUENTES DE AGUA

La mayor parte de las fuentes de agua dulce del mundo, se encuentra bajo suelo y en ríos, arroyos y lagos¹⁵. Como la mayoría de los acuíferos son alimentados desde la superficie por filtración, son más susceptibles a contaminarse, por lo que el agua de producción de un campo petrolero, que tiene gravedad específica similar a la del agua superficial y es fácilmente mezclable con las aguas de la capa freática, constituye uno de los principales factores de contaminación del agua subterránea. Si una capa freática con un nivel de cloruro de, por ejemplo, 150 ppm fuese contaminada por una salmuera de yacimiento petrolero con 180,000 ppm de cloruros, se requeriría un nivel de dilución de 1200 para volver el agua a un nivel aceptable de cloruros de 250 ppm¹⁶. En consecuencia, los costos de tratamiento y manejo del agua de producción, son hoy por hoy, la problemática a solucionar a un costo efectivo aceptable.

1.2 VOLUMEN DE AGUA PRODUCIDA

Generalmente cuando se inicia la producción de crudo, el volumen de agua producida es relativamente bajo, pero, es en sí cierto, que en el transcurso de su explotación, que puede ser de muchos años, este volumen aumentará

¹⁵ARPEL. Asociación Regional de Empresas del sector Petróleo, gas y biocombustibles en Latinoamérica y el Caribe. Disposición y tratamiento del agua producida. 1992.

¹⁶Ibid.

progresivamente. Si la producción de crudo es en más de una zona, es posible que con una reconstrucción del pozo se retrase el aumento del volumen de agua producida, pero una vez haya irrupción de agua, es seguro que esta aumentará. Inicialmente, la relación agua-petróleo es baja, pero una vez que el agua aflora la relación incrementa considerablemente, dada la saturación de agua en la vecindad del pozo. Eventualmente, el trabajo de producción puede no ser económicamente rentable, debido a los costos de tratamiento y disposición que conlleva el agua producida.

1.3 SALES Y SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN

El agua producida contiene una gran variedad de sales disueltas (como cationes y aniones), sólidos suspendidos y gases. Algunos son simplemente objetables mientras otros son tóxicos y pueden concentrarse en la cadena alimenticia¹⁷.

Los efectos de los iones y compuestos más comunes se describen en la Tabla 1:

Tabla 1. Principales efectos y concentraciones de los contaminantes frecuentes en agua de producción de un campo petrolero

Iones, compuestos y/o factores	Concentraciones promedio en agua de producción	Efectos sobre la salud humana y ambiental
Sodio y cloruros, mg/L	10598	Altos niveles de sal en el agua, impiden el uso para irrigación. La combinación del sodio y los sulfuros confieren al agua propiedades tóxicas para el consumo humano.

¹⁷Ibid.

Tabla 1. (Continuación)

Iones, compuestos y/o factores	Concentraciones promedio en agua de producción	Efectos sobre la salud humana y ambiental
Sólidos en suspensión, mg/L	158	Disminuyen la producción primaria y pesquera. Aumentan el proceso de sedimentación y secado de cuerpos de agua.
Bario y otros metales pesados µg/L	2.98	Tóxicos para la salud humana y los ecosistemas.
Sulfuros, mg/L		Tóxicos para la fauna acuática.
Aceites y grasas, mg/L	1213	Impiden los proceso de fotosíntesis en el agua y pueden ser tóxicos para la fauna acuática
Radiactividad, mg/L	45	Altas concentraciones de radioactividad son nocivas para la salud.
Concentración salina, mg/L	150000	A altos niveles de salinidad el agua es muy toxica para casi todas las formas de vida.
Temperatura, °C	20	Puede producir desordenes fisicoquímicos en el ecosistema acuático.
compuestos orgánicos, BOD + BTEX (mg/L)	14.696.067	Aumentan el grado de eutrofización de cuerpos de agua

Fuente. Davis, B. y Wallace, S. Pilot scale engineered wetland for produced water treatment'. SPE 120257-PA. Septiembre 2009. En: Onepetro.; ARPEL, 1992.

1.4 MÉTODOS COMUNES DE MANEJO Y DISPOSICIÓN DEL AGUA DE PRODUCCIÓN

Existen algunos métodos de dispersión o disposición del agua de producción usados en todo el mundo. Aunque estos métodos son aceptados para la industria, no son recomendados debido a que no tienen en cuenta el efecto que ejercen sobre el medio ambiente.

A continuación se presentan los métodos más usados por la industria:

1.4.1 Descarga Costa Afuera. La descarga al mar en la mayoría de los países que lo permiten, están controlados por normas que lo regulan, pero en el caso de Colombia, aunque hay una normativa para regular la descarga en aguas superficiales¹⁸, aun no existe un control para la descarga costa afuera. Las descargas se hacen en aguas profundas (más de 30 m) y más allá de la profundidad de crianza y pesca de mariscos.

Frecuentemente para la descarga se usa un pilote desnatador. Este equipo es sencillamente un pilote que está abierto al mar en el fondo. Se vierte el agua cerca de la superficie por debajo del nivel del agua. El pilote proporciona algún tiempo de separación adicional para el aceite todavía atrapado en el agua. El hidrocarburo que se separa se desnata y se recicla al sistema de tratamiento de agua para su recuperación¹⁹.

1.4.2 Evaporación en campo abierto. La evaporación ha sido usada durante muchos años en distintas partes, pero tiene unas restricciones de espacio, es decir, se requiere de mucho terreno para disponer del volumen de agua que debe evaporarse, lo que hace que este método de eliminación sea poco práctico, a menos que sea usado en proyectos cortos o que se sepa que los volúmenes de producción y de agua serán extremadamente bajos y el análisis financiero muestre rentabilidad con lo planteado.

Se deben considerar varios problemas para proponer la evaporación, estos incluyen:

¹⁸ Ministerio de medio ambiente. Decreto 4728. Op.cit.

¹⁹ Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes. Op.cit.

- La contaminación de aguas subterráneas: tal vez es el problema más importante. Esta contaminación se puede disminuir asegurando que las instalaciones de almacenamiento y retención sean impermeables.
- Mala utilización del terreno: Debe asegurarse que el terreno sea realmente apto para la evaporación y no haya sub-utilización del mismo.
- La intervención humana: Generalmente se deben tener en cuenta los problemas que pueden ocasionar las personas que viven en las cercanías de donde van a ser las instalaciones de evaporación, aunque generalmente las zonas que cumplen las condiciones de evapotranspiración son desiertas.
- La mortandad de la fauna silvestre: En las zonas donde cae poca lluvia y esta lluvia se evapora rápidamente, los animales silvestres se ven atraídos a las instalaciones de evaporación, por esto se recomienda implementar algún método de cerramiento.
- La contaminación de la superficie: Se ve en muchas zonas en donde las lluvias son de corta duración, pero de gran intensidad, las cuales pueden causar arrates del agua superficial.
- Los sólidos disueltos: Los sólidos disueltos, tales como las sales se acumulan en los fosos de eliminación del terreno y deben ser retirados periódicamente.

1.4.3 Disposición en Pozos de Poca Profundidad. Esta disposición consiste en inyectar el agua en pozos no productores construidos a profundidades entre 600 y 2000 pies. Siempre que se haya realizado un estudio completo de cualquier arena de agua dulce dentro de la zona inmediata, y se verifique que no hay

comunicación en la dirección de flujo de la capa acuífera, por ejemplo en un radio de 10 km²⁰.

1.4.4 Descarga Controlada en agua dulce. Primero cabe destacar que no es recomendable hacer descargas en cuerpos de agua dulce, aunque es una práctica aceptada en la industria bajo un control de regulación²¹. En la Tabla 2 se describen los valores límites permisibles para la disposición de las descargas a fuentes de agua dulce, según el Decreto 4728 de 2010 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Tabla 2. Valores límites máximos permisibles en mg/L para descargas a agua superficial y alcantarillados

PARÁMETRO	VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES	
	CUERPO DE AGUA SUPERFICIAL	ALCANTARILLADO PÚBLICO
Generales		
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	400,0	600,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	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
Hidrocarburos		
Hidrocarburos Totales(HTP)	10,0	10,0
Nutrientes		
Fósforo Total (P)	2,0	4,0
Compuestos Nitrogenados		
Nitrógeno Total (N)	40,0	40,0
Iones		
Cianuro (CN ⁻)	0,5	1,0
Cloruros (Cl ⁻)	1.200,0	1.200,0
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	300,0	500,0
Sulfuros (S ²⁻)	2,0	3,0

²⁰Ibid.

²¹Ibid.

Tabla 2. (Continuación)

PARÁMETRO	VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES	
	CUERPO DE AGUA SUPERFICIAL	ALCANTARILLADO PÚBLICO
Metales y Metaloides		
Arsénico (As)	0,1	0,3
Bario (Ba)	0,5	5,0
Cadmio (Cd)	0,01	0,1
Cinc (Zn)	0,5	2,5
Cobre (Cu)	0,5	1,5
Cromo (Cr)	0,2	0,4
Mercurio (Hg)	0,01	0,2
Níquel (Ni)	0,5	2,0
Plata (Ag)	0,5	1,0
Plomo (Pb)	0,1	0,25
Selenio (Se)	0,1	0,25
Vanadio (V)	0,5	2,0

Fuente. Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. Decreto 4728 de 2010. En: <http://www.minambiente.gov.co>. [Revisión 5.0, Octubre, 2012].

El método de descarga de agua dulce se lleva a cabo bajo el control regulador impuesto sobre los niveles de aceite y sólidos disueltos en el agua de producción, sin embargo, posibles errores en los procesos de tratamiento podrían producir acumulaciones mayores de aceites en las descargas. Igualmente, aun con niveles bajos de sal en el agua de producción, existe la posibilidad de una acumulación considerable en los suelos adyacentes, en los que pueden generar daños permanentes.

1.5 TRATAMIENTOS PRELIMINARES REQUERIDOS ANTES DE LA DISPOSICIÓN

Los tratamientos necesarios para el agua de producción antes de hacer su descarga, dependen de diferentes factores, tales como, el método de disposición del agua producida, la condición de esta y su origen. Los tratamientos más comunes son los separadores (de agua libre y tres fases), los tanques desnatadores y los tratadores.

1.5.1 Deshidratadores Mecánicos y Separadores de Tres Fases. Para los pozos que producen cantidades moderadas de agua, el aceite y el agua pueden separarse del gas en separadores de tres fases. La separación del aceite del agua, ocurre inicialmente en una cámara de gravedad con salidas separadas para el aceite y el agua, donde la descarga del aceite y del agua es controlada por válvulas de flotación individuales²². El control de estos separadores se hace mediante dispositivos de presión, nivel y temperatura.

1.5.2 Tratadores. El agua y el aceite son líquidos no miscibles (ósea que no se mezclan en condiciones normales) que forman combinaciones llamadas emulsiones. Uno de estos dos líquidos se esparce en el otro en forma de gotas. Estas gotas pueden ser de diferentes tamaños, desde medianamente grandes hasta muy pequeñas. Una emulsión aceite-agua podrá contener desde muy poca hasta 90% de agua²³.

Una emulsión puede ser floja (fácil de romper) o dura (difícil de romper). Esta condición de que la emulsión sea floja o dura, se define por varios factores, como lo son las propiedades del agua y el aceite.

Las emulsiones de requieren alguna forma de tratamiento para romperse se denominan emulsiones estables. Para estos tipos de emulsiones, se acostumbra aplicar calor, electricidad o productos químicos o simplemente dejar en reposo por un tiempo prudencial para drenar el agua separada.

1.5.3 Remoción de Petróleo Disperso. El aceite disperso en el agua es uno de los problemas más importantes, aunque los supervisores que estipulan los requisitos mínimos para la su disposición, se enfocan más en la descarga en superficie, también es muy importante tener en cuenta los niveles de aceites y

²²ARPEL. Op.cit.

²³Ibid.

grasas en el agua, en el caso de hacer un sistema de inyección, principalmente en zonas que no contenían aceite.

Si el agua que sale del separador aun contiene niveles altos de aceite, es necesario hacer un tratamiento adicional para la remoción del aceite en el agua. Entre los posibles tratamientos adicionales que se pueden aplicar, están:

- Tanques desnatadores
- Coalescedores
- Separadores de placas paralelas
- Hidrociclones
- Celdas de flotación con gas

1.5.4 Eliminación de Gas Disuelto. Las plantas de tratamiento de agua pueden clasificarse mediante el tipo de sistema que tengan, ya sea abierto o cerrado. En un sistema cerrado, el agua nunca tiene contacto con el aire, así se evita las pérdidas de gas en solución y el aire atrapado. Como ventaja de este sistema, los gases que estén disueltos en el agua se mantienen en solución. Como ejemplo, si existe dióxido de carbono y calcio, se inhibe la precipitación de carbonato de calcio, además también se evita la oxidación de hierro disuelto y de sulfuros²⁴.

En un sistema abierto, por el contrario, se airea el agua a tratar, haciendo uso de grandes estanques que dan tiempo para que el agua se estabilice y retirar los gases no deseables, además de permitir la precipitación de partículas que se encontraban en suspensión y la coalescencia de las gotitas de aceite en la superficie. En la práctica, este tratamiento, puede eliminar algunos gases como oxígeno, ácido sulfhídrico y CO₂.

²⁴Ibid.

1.5.5 Eliminación de Sólidos en Suspensión. Si la disposición del agua va a ser por inyección, es muy importante retirar los sólidos en suspensión ya que estos sólidos pueden taponar la formación. Si la disposición va a ser por vertimiento en el mar, solo es necesario filtrar el agua para obtener un nivel máximo de 100 mg/l⁽²⁵⁾, ya que en este caso el efecto es mucho menor. Hay una gran variedad de sistemas de filtros disponibles en la industria, entre los más comunes están:

- Filtros de Lecho Graduados Convencionales
- Filtros de Alta Velocidad, Lecho Profundo y Flujo Ascendente
- Filtros de Alta Velocidad, Lecho Profundo y Flujo Descendente
- Filtros de Tierra Diatomácea (TD)
- Filtros Cartuchos
- Sedimentación

1.5.6 Biocidas. El agua tratada para inyección puede contener bacterias que ocasionaran problemas al yacimiento y al sistema de tuberías, por lo que se hace necesario añadir biocidas. Hay miles de especies de bacterias y pueden duplicar su número en cuestión de minutos, abrumando literalmente el fluido.

Las bacterias pueden soportar amplias variaciones de temperatura (-10 a 100 °C), de valores de pH (0 a 10.5) y variaciones en las concentraciones de oxígeno (0 a 100%). En el agua se desarrollan mejor con un pH de 5 - 9, temperaturas menores de 80 °C y, aunque prefieren el agua dulce, se adaptan bastante a las salmueras²⁶.

²⁵Norma de calidad ambiental. Op.cit.

²⁶ARPEL. Op.cit.

1.6 NORMATIVA AMBIENTAL NACIONAL E INTERNACIONAL

Las regulaciones de los gobiernos del mundo sobre las descargas a cuerpos de agua son una constante que cada vez es más rigurosa. Sin embargo, todos los países manejan distintas regulaciones en donde las concentraciones de los contaminantes básicos varían de acuerdo a los estudios realizados en cada gobierno. La tabla 3 muestra algunos ejemplos en países de Latinoamérica, así como en los Estados Unidos, haciendo especial énfasis en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y en los sólidos suspendidos totales (SST) como contaminantes seleccionados, debido a que serán analizados en los capítulos posteriores:

Tabla 3. Normativa Ambiental en Distintos Países de América.

PAÍS	AUTORIDAD AMBIENTAL	RESTRICCIONES		OBSERVACIONES
		DBO ₅ mg/L	SST mg/L	
Perú	Autoridad Nacional del Agua (ANA) ²⁷ .	100	100	Establece parámetros restrictivos en comparación con la norma colombiana.
México	Norma Oficial Mexicana (NOM) ²⁸ .	30	40	Estableció la NOM en 1996, mostrando el aventajamiento sobre Colombia.
Ecuador	Ministerio de Energía y Minas ²⁹ .	100	100	Maneja los mismos valores de la norma peruana.
Cuba	Oficina Nacional de Normalización (NC) ³⁰ .	30-150	30-150	El vertimiento es exclusivo para aguas marinas.

²⁷ Norma de calidad ambiental y de descarga de efluente: recurso agua. 2002. Op.cit.

²⁸ NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-ECOL-1996.

²⁹ Reglamento Ambiental de Actividades Hidrocarburíferas. Decreto Ejecutivo 1215, Registro Oficial 265 de 13 de Febrero del 2001.

³⁰ Vertimiento de Aguas Residuales a la Zona Costera y Aguas Marinas — Especificaciones. Norma Cubana Obligatoria. 2007.

Tabla 3. (Continuación)

PAÍS	AUTORIDAD AMBIENTAL	RESTRICCIONES		OBSERVACIONES
		DBO ₅ mg/L	SST mg/L	
Estados Unidos	Environmental Protection Agency (EPA) ^{31,32} .	No se permite vertimiento.	No se permite vertimiento.	En caso de ser necesario el vertimiento, se debe expedir un permiso en el que se solicite la caracterización para la posterior delimitación de los valores a verter.
Colombia	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).	200	180	Evidencia un retraso en la implementación de regulaciones para el vertimiento a cuerpos de agua.

³¹ National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES). En: http://cfpub.epa.gov/npdes/home.cfm?program_id=45.

³² Produced Water Management Information System. Federal Regulations: U.S. Environmental Protection Agency. En: <http://www.netl.doe.gov/technologies/pwmis/regs/federal/epa/index.html>

2. HUMEDALES CONSTRUIDOS (HC): TECNOLOGÍA NATURAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LOS HC

Los HC han sido ampliamente estudiados y aplicados en Estados Unidos y Europa desde principios de la década de los 70's^{33,34}. 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 Alemania³⁵ estudiando la posible eliminación de compuestos orgánicos. 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 industriales³⁶.

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 bombeo³⁷. 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

³³VYMAZAL Y KRÖPFELOVÁ. Op.cit.

³⁴KADLEC y WALLACE. Op.cit.

³⁵Ibid.

³⁶BRIX H. y ARIAS C., 2007. Desarrollos innovativos en humedales construidos. En: Seminario internacional "Fundamentos y diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales". Pereira Colombia, Febrero 22 – 24 de 2007.

³⁷KADLEC, R.H. y KNIGHT, R.L. The Use of Treatment Wetlands for Petroleum Industry Effluents. En: Environmental Science & Technology. 1999. Vol.33, n.º.7.

susceptibles a las variaciones en la carga contaminante comparado con los sistemas de tratamiento convencional³⁸.

En general, los humedales son ecosistemas someros donde interactúan agua, suelo y microorganismos 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. Este complejo ecosistema sugirió su uso potencial como sistemas ingenieriles para el tratamiento de contaminantes presentes en las aguas usadas en el mundo³⁹. 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 y potencializar las ventajas de los procesos que ocurren en los humedales naturales dentro de un ambiente controlado⁴⁰.

Al igual que otras tecnologías de tratamiento biológico, los sistemas de humedales proporcionan beneficios adicionales, como confiabilidad, menor inversión energética y química y poco personal para su operación y mantenimiento⁴¹.

Actualmente, los humedales construidos se usan para tratar todo tipo de aguas residuales, incluyendo aquellas provenientes de las operaciones industriales, agropecuarias y los lixiviados de rellenos sanitarios⁴².

2.2 TIPOS DE HC

En la Figura 1 se ilustran los tipos de HC más comunes: humedales de flujo superficial (FS) y de flujo sub-superficial (FSS). Los HC de FS consisten en canales poco profundos, con material granular, donde se arraiga la vegetación y

³⁸MOSHIRI, G.A. Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Lewis Publishers. Florida. 1993.

³⁹KADLEC y KNIGHT. Op.cit.

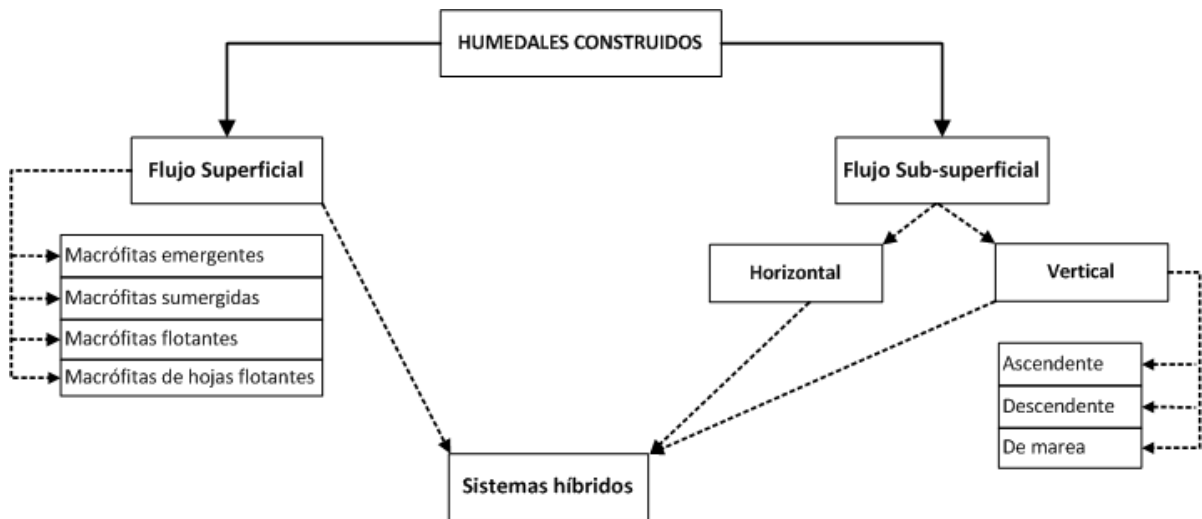
⁴⁰VYMAZAL. Op.cit.

⁴¹USEPA. United State Environmental Protection Agency. Subsurface Constructed Wetland for Wastewater Treatment, a technology assessment. Office of Water Washington, D.C.2000a.

⁴²VYMAZAL Y KRÖPFELOVÁ. Op.cit.

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 microorganismos⁴³. 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^{44,45}.

Figura 1. Clasificación de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales según régimen de flujo de agua y tipo de crecimiento de plantas



Fuente. Modificado de: VYMAZAL, J. y KRÖPFELOVÁ, L. Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow. Environmental pollution. Vol. 14. 2008.

2.3 HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUPERFICIAL

Los humedales construidos de flujo superficial (HCFS) (Figura 2), son estanques o canales estrechos poco profundos en los que la superficie del agua se encuentra expuesta a la atmósfera y las plantas emergentes están enraizadas sobre una capa de suelo, generalmente impermeabilizado, para evitar la infiltración al manto freático⁴⁶. Los componentes típicos de un humedal de flujo superficial se muestran

⁴³VYMAZAL, J. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. Ecological Engineering 35. 2009.

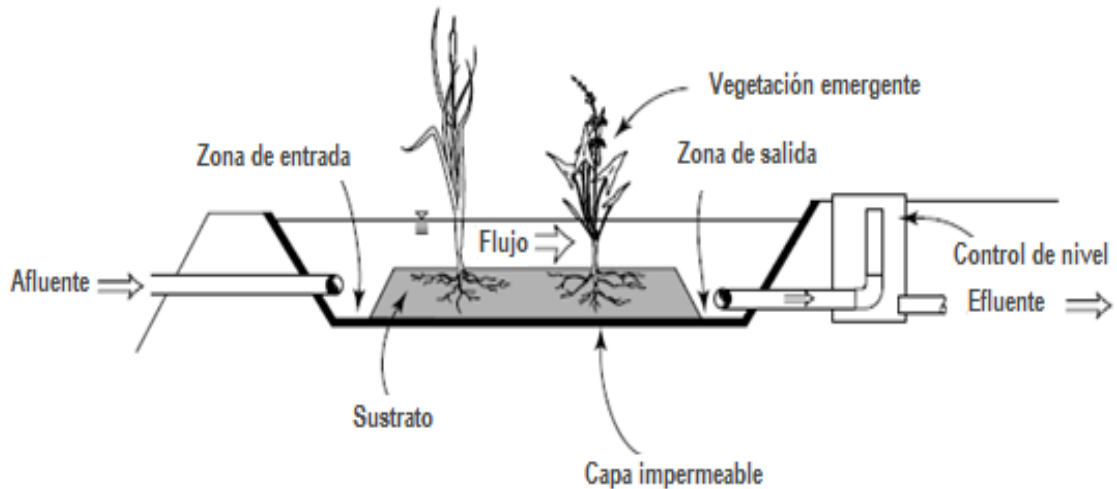
⁴⁴Ibid.

⁴⁵ WANG, L.K., et al. Environmental Bioengineering. Handbook of environmental engineering vol 11.HumanaPress. 2010.

⁴⁶ SILVA, J.P. Humedales Construidos. Fundamentos, Diseño y Operación. Curso Internacional Gestión Integral del Tratamiento de Aguas Residuales. Universidad del Callao – Lima (Perú). 2002.

en la figura 2. Se han aplicado principalmente para la restauración de ambientes y creación de zonas húmedas permitiendo el desarrollo de la flora y fauna^{47,48}.

Figura 2. Elementos básicos de un humedal de flujo superficial



Fuente. Modificado de: KADLEC, R.H. y WALLACE, S.D. Treatment Wetlands. 2ed. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2009.

2.4 HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUB-SUPERFICIAL

Los HC de flujo sub-superficial (HCFSS) son sistemas de tratamientos compuestos por celdas, estanques o canales impermeabilizados en los cuales el agua residual fluye a través de un lecho poroso de grava o tierra en el cual la vegetación emergente es plantada^{49,50}. Estos humedales pueden dividirse en humedales de flujo horizontal (FH) y humedales de flujo vertical (FV). La principal diferencia entre estos dos sistemas es el sentido del flujo del agua, mientras que en el de FV el agua puede fluir desde la superficie hasta el fondo, en los de FH el agua circula desde una zona de entrada hasta una zona de salida en forma horizontal⁵¹.

⁴⁷WANG. Op.cit.

⁴⁸VYMAZAL Y KRÖPFLOVÁ. Op.cit.

⁴⁹Ibid.

⁵⁰SILVA. Op.cit.

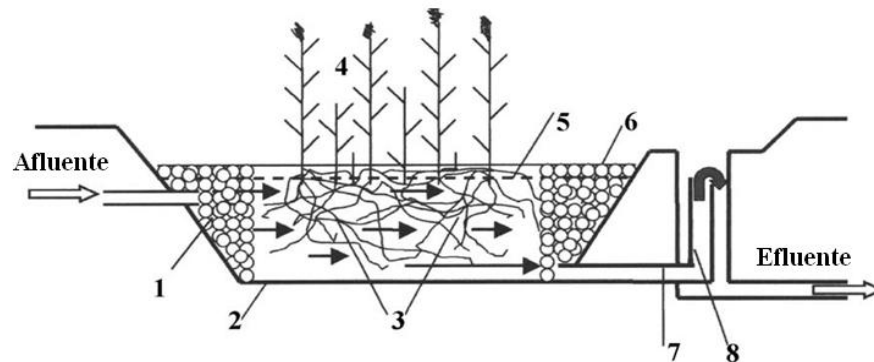
⁵¹KADLEC y WALLACE. Op.cit

Los HCFSS generalmente se utilizan para tratar flujos de agua residual menores que en los humedales de flujo superficial, muy probablemente debido a consideraciones económicas y locativas. Sin embargo, su uso puede ir desde aguas residuales domésticas hasta aguas residuales industriales⁵².

2.4.1 Humedales construidos de flujo sub-superficial horizontal (HCFSSH).

En la Figura 3 se describen los componentes de un HCFSSH. Se le llama flujo horizontal, debido a que el agua residual fluye lentamente desde una zona de entrada, a través del medio poroso, siguiendo una ruta más o menos horizontal hasta, alcanzar la zona de salida. Durante este recorrido el agua residual es tratada a través de la combinación de procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren al interior del humedal⁵³. Así, la mayor parte de la biomasa vegetal y otros desechos se encuentran contenidas sobre la superficie del lecho y no interactúan con el agua que fluye por los intersticios inferiores del humedal⁵⁴.

Figura 3. Representación de un humedal construido de flujo sub-superficial horizontal.



Fuente. VYMAZAL, J. The use of constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. Ecological Engineering 35. 2009.

Los ocho componentes de la figura 3 son: 1) Distribución de la zona de llenado con material granular de gran tamaño; 2) línea impermeable; 3) medio filtrante

⁵²Ibid.

⁵³VYMAZAL Y KRÖPFLOVÁ. Op.cit.

⁵⁴Ibid.

(grava, material granular prensado); 4) Vegetación; 5) nivel del agua en el lecho; 6) zona recolección de llenado con material granular de gran tamaño; 7) Tubos de drenaje y 8) salida del flujo de agua de la planta para el mantenimiento del nivel de agua en el lecho.

2.4.2 Humedales construidos de flujo sub-superficial vertical (HCFSSV).

Estos sistemas se diferencian principalmente de los HCFSSH debido a su capacidad para remover nutrientes como el nitrógeno, gracias a la mayor transferencia de oxígeno dentro del lecho^{55,56,57}.

En los humedales con flujo vertical el agua residual es aplicada uniformemente sobre la superficie del lecho y el efluente tratado sale por unos tubos perforados que se encuentran en el fondo del lecho. El agua es aplicada usualmente a intervalos de tiempo, lo que permite que el agua percole a través del medio, el lecho es drenado completamente y permite que el aire rellene el lecho. Este tipo de dosificación, permite una buena transferencia de oxígeno y por lo tanto la habilidad para la nitrificación^{58,59}.

2.4.3 Sistemas Combinados. Existe un creciente interés en los sistemas híbridos o también llamados sistemas combinados, donde es posible producir un efluente con bajas concentraciones de materia orgánica (DBO5), y amonio. Mientras que los HCFSSH tienen capacidad limitada en la transferencia de oxígeno, los HCFSSV pueden permitir procesos de nitrificación en presencia de oxígeno, combinándose ambientes aeróbicos y anaeróbicos para una mayor eficiencia en la depuración⁶⁰.

⁵⁵Ibid.

⁵⁶KADLEC y WALLACE. Op.cit

⁵⁷SILVA. Op.cit

⁵⁸Ibid.

⁵⁹VYMAZAL Y KRÖPFLOVÁ. Op.cit.

⁶⁰Ibid.

2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS HC

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en la tecnología de HC pueden ser más económicos que los sistemas convencionales dado que su operación en la mayoría de los casos no requiere el uso de equipos mecánicos o eléctricos por parte de operarios calificados^{61,62}. Pueden ofrecer mejores resultados respecto a la remoción de sólidos suspendidos y de la demanda bioquímica de oxígeno a costos relativamente más bajos⁶³.

Además, los HC pueden servir como una reserva de conservación ambiental, y también pueden ser vistos como parques naturales para la recreación de la comunidad⁶⁴.

Respecto a los tipos de humedales, podemos afirmar que los humedales de flujo sub-superficial tienen ventaja sobre los humedales de flujo superficial ya que el proceso de tratamiento es llevado a cabo fundamentalmente por los microorganismos adheridos a las raíces de las plantas y al medio granular, ya que el medio poroso brinda mayor área superficial para el crecimiento de los microorganismos. Por otra parte, debido a que el agua en estos sistemas fluye por debajo de la superficie del medio, no se presentan problemas con el desarrollo de los mosquitos y otros vectores, además de proporcionar protección térmica, lo que hace que estos sistemas puedan ser utilizados en lugares donde ocurran grandes nevadas⁶⁵.

A pesar de todas sus ventajas, los HC generalmente requieren grandes áreas de terreno en comparación con los sistemas de tratamiento de agua residual convencionales. El tratamiento por medio de los humedales puede ser

⁶¹USEPA. United state Environmental Protection Agency. Constructed Wetlands Treatment of Municipal wastewaters, Manual. Office Research and Development Cincinnati, Ohio. 2000b.

⁶²CASELLES, A., et al. Solids accumulation in six full-scale subsurface flow constructed wetlands. Water Research 41. 2007.

⁶³USEPA. United state Environmental Protection Agency. Subsurface Constructed Wetland for Wastewater Treatment, a technology assessment. Office of Water Washington, D.C. 1993.

⁶⁴SCHOLZ, M. Wetland systems to control urban Runoff. Elsevier. Edimburg. 2006.

⁶⁵SILVA. Op.cit.

relativamente económico siempre y cuando el terreno sea el adecuado y esté disponible⁶⁶.

Otra desventaja es que el desempeño de los HC puede ser menos consistente que un sistema de tratamiento convencional. La eficiencia puede variar periódicamente de acuerdo a las condiciones ambientales, como lo son la época de lluvia y la de sequía. Por lo tanto, el tratamiento no puede basarse en esta tecnología si la calidad del agua después del tratamiento debe coincidir con estándares de descarga muy estrictos todo el tiempo⁶⁷.

Uno de los principales problemas operacionales de los HCFSS es el efecto de acumulación de materia orgánica e inorgánica proveniente principalmente del afluente del sistema, el cual causa la colmatación del lecho granular, que se manifiesta en la disminución de la conductividad hidráulica^{68,69,70,71}.

2.6 PRINCIPALES COMPONENTES DE LOS HC

La hidrología es el factor más importante en el diseño de HC ya que tiene relación con todas las funciones del humedal. Además es, muchas veces, el factor primario en el éxito o fracaso de un humedal construido. Otros componentes principales del humedal son:

2.6.1 El Suelo. En los humedales construidos de flujo sub-superficial el proceso de tratamiento de las aguas residuales es llevado a cabo, fundamentalmente, por un complejo grupo de microorganismos adheridos a las raíces de las plantas,

⁶⁶ DAVIS, L. A handbook of constructed wetlands. USDA-Natural Resources Conservation Service and the US Environmental Protection Agency-Region III. 1995. [en línea]. disponible en: <http://www.epa.gov/owow/wetlands/pdf/hand.pdf>

⁶⁷ Ibid.

⁶⁸ PEDESCOLL, A., et al. Practical method based on saturated hydraulic conductivity used to assess clogging in subsurface flow constructed wetlands. Ecological Engineering 35. 2009.

⁶⁹ CASELLES. Op.cit.

⁷⁰ HUA, G. F., et al. Clogging pattern in vertical-flow constructed wetlands: Insight from a laboratory study. Journal of Hazardous Materials 180. 2010.

⁷¹ KNOWLES, P. R.; GRIFFIN, P. y DAVIES, P. A. Complementary methods to investigate the development of clogging within a horizontal sub-surface flow tertiary treatment wetland. Water Research 44. 2010.

rizomas y sobre la superficie del medio⁷². El conjunto medio granular-biopelícula-plantas debe ser considerado como el principal constituyente de los humedales. En el medio granular ocurren múltiples procesos como la retención y sedimentación de la materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de los nutrientes, y la inactivación de los microorganismos patógenos, además, una característica muy importante del medio granular es su conductividad hidráulica, ya que de esta propiedad depende la cantidad de flujo de agua que puede circular a través de él⁷³.

2.6.2 Vegetación. Las plantas acuáticas emergentes son plantas herbáceas que se encuentran arraigadas en el subsuelo de cuerpos de agua poco profundos. Estas plantas poseen canales o zonas aéreas (aerénquima) que sobresalen por encima del nivel del agua y facilitan el paso del oxígeno hasta las raíces⁷⁴. Las raíces proporcionan sustrato para los procesos microbiológicos y dado que la mayoría de las macrófitas emergentes pueden transmitir oxígeno de las hojas a las raíces, se presentan micro zonas aeróbicas en la superficie de las raíces y los rizomas⁷⁵.

De acuerdo con García y Corzo (2008), los efectos de la vegetación sobre el funcionamiento de los humedales están relacionados con la mayor superficie que aportan las raíces para el desarrollo de la biopelícula, igualmente asimilan nutrientes y amortiguan las variaciones ambientales. Numerosas especies de macrófitas acuáticas han sido usadas para procesos de depuración en humedales principalmente del grupo de las Ciperáceas, Gramíneas, Juncáceas y Tifáceas⁷⁶.

⁷²SILVA. Op.cit.

⁷³ GARCÍA, J. y CORZO, A. Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya. 2008.

⁷⁴ ÑIQUE, M. Glosario Ambiental Multidisciplinario. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. 2008. [En línea] << <http://www.monografias.com/trabajos-pdf/glosario-ambiental-multidisciplinario/glosario-ambiental-ultidisciplinario.pdf>>>. [Revisado: Marzo 5 del 2010].

⁷⁵USEPA. 2000a. Op.cit.

⁷⁶Ibid.

2.6.3 Microorganismos. Una característica fundamental en los humedales es que sus funciones son reguladas en gran parte por los microorganismos y su metabolismo⁷⁷. En los humedales se desarrollan una gran variedad de organismos que incluyen a las bacterias, levaduras, hongos, protozoos y algas⁷⁸.

Los microorganismos son responsables de la transformación de un gran número de compuestos orgánicos e inorgánicos en sustancias inocuas o insolubles; alteran las condiciones de reducción-oxidación del sustrato y por lo tanto afectan la capacidad de procesamiento del humedal⁷⁹. Además, participan en el reciclaje de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo.

La actividad microbiana es particularmente importante en las transformaciones del nitrógeno en sustancias biológicamente útiles. El fósforo absorbido por las plantas también es dependiente en parte de la actividad microbiológica, la cual convierte las formas insolubles de fósforo en formas solubles disponibles para la vegetación⁸⁰.

Por último, la población microbiana de un HC puede ser afectada por sustancias tóxicas, tales como pesticidas y metales pesados, por lo que debe prevenirse concentraciones muy altas de estas sustancias⁸¹.

2.7 MECANISMOS DE ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES

En los procesos que se llevan a cabo en el humedal se presentan distintos fenómenos físicos, químicos y biológicos que permiten la eliminación de contaminantes. Sin embargo, cada contaminante es removido por un proceso específico, el cual se describe a continuación:

⁷⁷SILVA. Op.cit.

⁷⁸DAVIS. 1995. Op.cit.

⁷⁹Ibid.

⁸⁰USEPA. 2000a. Op.cit.

⁸¹DAVIS. 1995. Op.cit.

2.7.1 Sólidos en Suspensión. La materia en suspensión queda retenida en los humedales mediante la combinación de diferentes fenómenos de tipo físico que en su conjunto se conocen como filtración del medio granular⁸². Los mecanismos predominantes para la eliminación de los sólidos suspendidos son la floculación, sedimentación y la filtración, mientras que la producción de material suspendido puede ocurrir debido a la fragmentación de los desechos de las plantas, producción de plancton y microbios en el agua o en la superficie de las plantas, y la formación de precipitados químicos como sulfuro de hierro⁸³.

En los HCFSSH, la mayor parte de la eliminación de la materia en suspensión sucede cerca de la zona de entrada y su concentración puede ir disminuyendo en forma exponencial a lo largo del lecho. En general, casi toda la eliminación de la materia en suspensión sucede en un cuarto o un tercio de la longitud total del sistema. En los sistemas verticales la retención de la materia en suspensión ocurre en los primeros centímetros del medio granular. Su concentración disminuye de forma similar a como ocurre en los horizontales pero en sentido vertical. Los HCFSS son relativamente efectivos en la remoción de sólidos suspendidos debido a la baja velocidad y a la gran área superficial del medio poroso. Estos sistemas actúan como filtros de grava por lo que permiten la sedimentación por gravedad, captura física, y la adsorción sobre la capa de biomasa adherida a la grava y a las raíces⁸⁴.

Un contenido excesivo de materia en suspensión en el agua residual de tipo inorgánico u orgánico recalcitrante (>50 mg/L) por ejemplo, si no se dispone de un pre-tratamiento efectivo, puede provocar una pronta colmatación de los humedales. Estos aspectos deben considerarse durante el diseño⁸⁵.

⁸²GARCÍA. Op.cit.

⁸³USEPA. 2000a. Op.cit.

⁸⁴Ibid.

⁸⁵GARCÍA. Op.cit.

2.7.2 Materia Orgánica. La eliminación de la materia orgánica en los humedales es compleja ya que es el resultado de la interacción de numerosos procesos físicos, químicos y biológicos que suceden de forma simultánea.

La materia orgánica es retenida por filtración cerca de la entrada en sistemas horizontales y cerca de la superficie en verticales. Esta se convierte en partículas más pequeñas que pueden ser hidrolizadas por enzimas extracelulares. Las enzimas son excretadas por bacterias heterótrofas aeróbicas y fermentativas facultativas. El resultado de la hidrólisis es la formación de sustratos sencillos (por ejemplo glucosa o aminoácidos) que pueden ser asimilados por las bacterias heterótrofas aeróbicas o fermentativas facultativas. Los ácidos, a su vez, pueden ser asimilados por bacterias sulfatoreductoras, metanogénicas y también, por heterótrofas aeróbicas.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que muchas sustancias disueltas se retienen por adsorción, bien en la propia materia orgánica o en el medio granular. Estas sustancias pueden simplemente quedar allí, o bien desplazarse y ser readsorbidas, o ser degradadas por microorganismos.

El rendimiento de eliminación de la materia orgánica en sistemas de humedales horizontales y verticales es óptimo si están bien diseñados, construidos y explotados. Tanto para la DQO como para la DBO se alcanzan rendimientos que oscilan entre 75 y 95% produciendo efluentes con concentración de DQO menor de 60 mg/L y de DBO menor de 20 mg/L⁽⁸⁶⁾.

2.7.3 Nitrógeno. En las aguas residuales urbanas el nitrógeno se encuentra fundamentalmente en forma de amonio y también como nitrógeno orgánico. En los humedales el principal mecanismo de eliminación de nitrógeno es de tipo microbiano y consiste en la nitrificación seguida de la desnitrificación. Sin

⁸⁶ Ibid.

embargo, también hay otros procesos que contribuyen a la eliminación como la adsorción del amonio y la asimilación realizada por las plantas. En los humedales, el ciclo del nitrógeno está acoplado al del carbono (materia orgánica) fundamentalmente a través de la desnitrificación.

La nitrificación es realizada en condiciones aeróbicas para reducir el amonio y convertirlo en nitrato; este proceso presenta un alto rendimiento en los humedales de flujo vertical, dado el carácter aeróbico de gran parte del lecho. Por otra parte, La reacción de la desnitrificación permite eliminar el nitrato formado previamente por la nitrificación y convertirlo en nitrógeno gas. Esta reacción sólo ocurre en condiciones de anoxia y en presencia de materia orgánica, por esta razón los humedales verticales tienen dificultades para eliminar el nitrato formado y frecuentemente se combinan en serie seguidos de humedales horizontales⁸⁷.

2.7.4 Fósforo. Igual que en los sistemas de depuración biológicos convencionales, la eliminación de fósforo en los humedales es complicada. En general, no se suele eliminar más del 10-20%, y sin haber grandes diferencias entre sistemas horizontales y verticales. Los mecanismos de eliminación del fósforo pueden ser de tipo biótico y abiótico. Los bióticos incluyen la asimilación por parte de las plantas y los microorganismos. Los abióticos abarcan fundamentalmente la adsorción por el medio granular. En muchos estudios se ha observado que después de la puesta en marcha de humedales, se obtiene una buena eficiencia de eliminación del fósforo para después reducirse rápidamente en poco tiempo. Esto es debido a que el medio granular limpio tiene capacidad de adsorción, pero esta se va perdiendo rápidamente⁸⁸.

⁸⁷ Ibid.

⁸⁸ Ibid.

2.8 FUNCIONAMIENTO DE LOS HC

Los humedales construidos funcionan como sistemas intensivos de tratamiento de aguas residuales de forma biológica. En estos sistemas, el flujo de agua entrante – que contiene partículas, sólidos en suspensión y otras sustancias propias de las aguas contaminadas – se distribuye a lo largo del área del humedal, permaneciendo en interacción con el suelo y las plantas que allí se encuentran. Todos estos contaminantes (en resumen, conocidos como sólidos totales en suspensión o SST) se precipitan y quedan atrapados en sedimentos debido a la baja velocidad de flujo. Al quedar atrapadas, estas partículas que contienen componentes que requieren una demanda química o bioquímica de oxígeno, hidrocarburos, materia orgánica, trazas de metales, nitrógeno y fosforo, entre otras sustancias, son parcialmente absorbidas por el suelo y la población de plantas y microorganismos allí encontrados, convirtiendo al humedal en un sistema de eliminación física, química y biológica⁸⁹.

Los HC son ecosistemas autotróficos. El resultado final de todos estos procesos que se llevan a cabo en su interior es la reducción de las concentraciones de estos contaminantes entre el punto de entrada de fluido y el punto de salida del HC. Es preciso acotar que la reducción de las concentraciones de contaminante rara vez supone la eliminación total del mismo, así como en algunas ocasiones las concentraciones de salida pueden ser mayores que las de entrada, esto debido al ingreso de contaminantes presentes en la atmosfera al sistema.

2.9 ESTADO DEL ARTE Y NECESIDADES ESPECÍFICAS DE LA INDUSTRIA PETROLERA

El agua de producción y demás aguas contaminadas de la industria petrolera contienen muchos de los contaminantes que poseen las aguas residuales domesticas de ciudades y municipios, además de contener varios hidrocarburos,

⁸⁹KADLECy WALLACE.Op.cit.

fenoles, sulfatos y metales. El potencial toxico que representan estos últimos componentes, constituye una problemática ambiental debido a la cantidad de descargas de agua que se realizan diariamente. En consecuencia, hoy por hoy, el tratamiento del agua producida constituye una de las necesidades más apremiantes de la industria petrolera considerando el impacto ambiental causado por la disposición de altos volúmenes de agua de producción contaminada y la crisis mundial por el recurso agua. Actualmente se tienen varios sistemas HC a escala real y muchos otros en forma piloto en el mundo. En la tabla 4 se muestran algunas de las plantas a escala real y piloto que se encuentran en funcionamiento en diferentes partes del mundo.

Tabla 4. Ejemplos de humedales construidos de la industria petrolera a gran escala y piloto para el tratamiento de agua de producción en diferentes partes del mundo

Sitio No.	Nombre del sitio/locación	Propósito	Origen aguas residuales	Tamaño total de los humedales (ha)	av flujo (m ³ /d)	refs
1	Amoco-Mandan, North Dakota, U.S.A.	Proceso de pulido del agua	Proceso de refinado del agua	16,6	5700	19,2
2	Chevron-Richmond, California, U.S.A.	Proceso de pulido del agua	Proceso de refinado del agua	36,4	9500	21
3	Yanshan Petrochemical, Beijing, China	Proceso de pulido del agua	Proceso de refinado del agua	50	100000	22
4	YanshanPetrochemical, Beijing, China	Instalación piloto	Proceso de refinado del agua	1,5		22
5	Jinling Petrochemical, Beijing, China	Instalación piloto	Proceso de refinado del agua	0,75		23
6	Suncor, Inc., Alberta, Canadá	Instalación piloto	Proceso de agua de arena petrolífera	0,08	17,3	24-27
7	BP Petroleum, Port Everglades, Florida, U.S.A.	Instalación piloto	Contaminación subterránea de terminales	0,007	27	28

Tabla 4. (Continuación)

Sitio No.	Nombre del sitio/locación	Propósito	Origen aguas residuales	Tamaño total de los humedales (ha)	av flujo (m ³ /d)	refs
8	Shell Oil-Norco, Louisiana, U.S.A.	Instalación piloto	Proceso de refinado del agua	0,02	547	29-31
9	Mobil Oil, Bremen, Germany	Instalación piloto	Efluente del tanque de granja		5	32
10	Texaco, U.S.A.	Instalación piloto	Proceso de refinado del agua	0,04		33
11	Australia	Instalación piloto	Aceite de terminales	0,06		34

Fuente. KADLEC, R.H. y KNIGHT, R.L. The Use of Treatment Wetlands for Petroleum Industry Effluents. En: Environmental Science & Technology. 1999. Vol.33, n.º.7.

Según Kadlec y Knight (1999), los HC diseñados en facilidades petroleras permiten la eliminación de diversos contaminantes, por ejemplo, se pueden alcanzar eliminaciones de materia orgánica biodegradable (expresada en términos de Demanda Biológica de Oxígeno a los cinco días de incubación, BDO₅) del 90%. Sin embargo, muchos compuestos orgánicos no son degradados biológicamente (materia orgánica total expresada como Demanda Química de Oxígeno, DQO) por lo que la eficiencia de estas sustancias puede ser mucho menor, lo que supone, para este tipo de aguas, niveles de DQO mucho mayores que los de DBO₅, en relación 20:1.

La eliminación de hidrocarburos en HC puede dificultarse si están presentes en altas concentraciones, ya que pueden ser muy tóxicos para las plantas y los microorganismos del humedal. Igualmente las condiciones aeróbicas o anaeróbicas predominantes en el humedal pueden afectar la degradación de los distintos componentes de estas aguas residuales.

Sin embargo, la mayoría de los hidrocarburos son productos naturales y biodegradables. Muchos de ellos no son tóxicos a menos que estén a altas concentraciones. A través de procesos naturales, los humedales producen varios compuestos orgánicos que, combinados con otros metales como el hierro, forman moléculas más complejas que pueden servir como controladores de las reacciones de reducción-oxidación (redox) propias del humedal.

De acuerdo con Kadlec and Knight (1999), sistemas de HCFSS usados para depurar aguas residuales de la industria petrolera, alcanzaron eliminaciones de DBO₅ entre 80 y 97%, de DQO entre 53 y 86%, y grasas y aceites de 54% (Tabla 5).

Tabla 5. Concentraciones promedio y eficiencia (%) de eliminación de materia orgánica de humedales construidos usados para tratar aguas industriales

Sitio No.	Tipo de humedal	Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco (5) días				Demanda Química de Oxígeno				Aceites y grasas		
		Conc. Prom. (mg/L)		Eficiencia (%)	k1 (m/y r)	Conc. Prom (mg/L)		Eficiencia (%)	k1 (m/y r)	Conc. Prom (mg/L)		Eficiencia (%)
		Entrada	Salida			Entrada	Salida			Entrada	Salida	
1	FS	79,4	12,4	84	11	131	40	69	7	2,1	0,13	94
2	FS	11,3	5,1	55						2,5	1	60
3	FS	38	15,3	60	75	170	47,5	72	104			
4	FS									0,84	0,29	65
9	FSS	700	20	97	71	1800	250	86	40			
10	FS	104	2,1	98	71							
11	FSS	75	15	80		101	47	53		24	11	54

Abreviaciones: FS: flujo superficial. FSS: Flujo subsuperficial. K₁= cte. de vel. De flujo con base al área. **Fuente.** Modificado de: KADLEC, R.H. y KNIGHT, R.L. The Use of Treatment Wetlands for Petroleum Industry Effluents. En: Environmental Science & Technology. 1999. Vol.33, n^o.7.

De otra parte, las plantas y el suelo de los HC contribuyen en la eliminación de contaminantes del agua residual de la industria petrolera. Las plantas transportan oxígeno desde las partes aéreas a las raíces y estas constituyen la superficie de adhesión para la gran diversidad de microorganismos. Diversas especies de macrófitas acuáticas han sido utilizadas para la depuración de aguas residuales en

HC, por ejemplo, el Jacinto de agua o taruya (*Eichornia crassipes*) usado en tratamiento de aguas de petróleo mostró ser eficiente en la eliminación de trazas de compuestos de hidrocarburos⁹⁰.

Respecto del suelo donde se instalan los sistemas de HC, estos pueden contener una gran proporción de compuestos orgánicos, los cuales tienen la habilidad de remover otros orgánicos mediante adsorción. Incluso, se puede usar arcilla como aditivo económico para favorecer los procesos de adsorción de orgánicos.

La eficiencia en la eliminación de los sólidos suspendidos totales (SST), en un HCFSS, puede estar entre el 80% y el 90%⁹¹. Como resultado de los procesos que se desarrollan en el interior del sistema, la concentración de SST disminuye a lo largo del humedal, desde el punto de entrada hasta el de salida. La tabla 6 muestra los resultados obtenidos en materia de eliminación de SST y fósforo en HC usados para tratar agua residual de la industria petrolera.

Tabla 6. Concentraciones promedio y eficiencias de eliminación (%) de sólidos suspendidos totales y fosforo en aguas residuales de la industria de petróleo tratada con humedales construidos

Siti o No.	Tipo de humedal	Sólidos suspendidos totales				Fósforo total			
		Conc. Prom (mg/L)		Eficiencia (%)	k1 (m/yr)	Conc. Prom (mg/L)		Eficiencia (%)	k1 (m/yr)
		Entrada	Salida			Entrada	Salida		
1	FS	106	11,7	89	13				7
2	FS	19,2	27	-41		28,7	18,9	34	
3	FS	181	41	77	122	1,51	0,43	72	104
5	FS					3,5	3,2	9	
10	FS	14,5	2,4	83	33	5,9	1,1	81	
11	FSS	38	20	47					

Abreviaciones: FS: flujo superficial. FSS: Flujo subsuperficial. K_1 = cte. De vel. De flujo con base al área.

Fuente. Modificado de: KADLEC, R.H. y KNIGHT, R.L. The Use of Treatment Wetlands for Petroleum Industry Effluents. *En: Environmental Science & Technology*. 1999.Vol.33, n^o.7.

⁹⁰KADELC y KNIGHT.Op.cit.

⁹¹CASELLES. Op.cit.

Los metales presentes en las aguas residuales del petróleo pueden estar afectados por las propiedades físicas (distribución de partículas, minerales presentes en el suelo) y químicas (capacidad de generar reacciones redox, pH, materia orgánica, salinidad, presencia de inorgánicos como sulfatos o carbonatos) del suelo del humedal, generando la absorción de los mismos o la formación de compuestos insolubles al reaccionar con iones como los sulfatos y carbonatos.

Los estudios realizados por Kadlec y Knight (1999) permiten concluir que la implementación de un HCFSSH para un campo en Colombia, puede ser una alternativa viable, considerando que la eficiencia del sistema en la depuración de muchos contaminantes presentes en el agua de producción es realmente elevada.

3. DISEÑO

Son numerosos los aspectos a tener en cuenta a la hora de realizar un diseño de un humedal construido, partiendo de las condiciones a las que se encuentra el lugar donde se desea implementar la tecnología. Estas condiciones definen el ambiente físico, químico y biológico en el que se desarrollará el humedal. Dentro de las variables a analizar se encuentran el clima, la geografía del lugar, el tipo de agua residual a tratar con su respectivo análisis químico, geología del terreno, precipitaciones de agua lluvia promedio y factores socioeconómicos⁹².

3.1 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

Basados en los criterios de diseño de Kadlec y Wallace (2009), las variables a tener en cuenta se organizan de la siguiente manera:

1. Determinar los caudales de entrada al humedal, así como las concentraciones del parámetro del agua a analizar.
2. Determinar las concentraciones a las que se desea reducir dicho parámetro del agua, de acuerdo con las regulaciones ambientales y niveles máximos permitidos en la zona de instalación del humedal.
3. Determinar tasas de entrada de agua y filtraciones permitidas.
4. Determinar rangos de temperaturas, lluvias y condiciones ambientales del lugar objetivo.
5. Seleccionar el humedal más adecuado (FS o FSS).

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace necesario describir las principales variables que definen la construcción del humedal, previo diseño realizado.

⁹²KADLEC y WALLACE.Op.cit.

3.1.1 Área requerida. Como se mencionó anteriormente, una de las desventajas de los humedales construidos es la gran cantidad de área requerida. Un ejemplo de esto es el hecho de que los humedales de flujo superficial (FS) se encuentren en la categoría de ‘tecnología para terrenos extensos’ en los Estados Unidos⁹³. Sin embargo, los caudales de agua y sus concentraciones no son los únicos que definen el área requerida para su implementación; también las condiciones de la zona deseada para su construcción limitan sus dimensiones, por lo que no siempre el tamaño del humedal dependerá del influjo de agua.

3.1.2 Geología y suelos. Los estudios de suelos comprenden una parte importante del entendimiento del subsuelo, y a su vez permiten controlar problemas de infiltraciones de agua de formación en la zona de influencia del humedal y viceversa. Si se presentara una interacción entre el agua de formación proveniente del subsuelo y el agua residual que se está tratando, las características fisicoquímicas del agua cambiarían, provocando una reducción en la eficiencia de eliminación del humedal. Así mismo, el conocimiento de la geología del lugar puede determinar si existen formaciones consolidadas o estratos rocosos, en donde la construcción del humedal sería inviable por los altos costos a la hora de realizar excavaciones en suelos de este tipo.

3.1.3 Agua de formación. Es importante tener conocimiento de las propiedades fisicoquímicas del agua presente en el subsuelo donde se pretende realizar el proyecto, ya que se hace necesario controlar y monitorear posibles infiltraciones de esta al humedal, así como del agua residual tratada en el humedal en el subsuelo. Esto debido a que un cambio en las propiedades del agua conlleva tanto a la ineficiencia del sistema como a una potencial invasión de aguas industriales en el subsuelo, lo que supone riesgos ambientales.

⁹³ Ibid.

3.1.4 Altitud. La altitud a la que se encuentre el humedal influye en el tipo de planta a usar en el sistema. No todas las plantas acuáticas pueden sobrevivir en altitudes superiores a los 4000 m.

3.1.5 Condiciones biológicas. La implementación de un humedal construido implica un cambio en el hábitat del ecosistema presente en la zona. Al cambiar vegetación de superficie por una vegetación húmeda, se genera un decrecimiento de poblaciones de fauna y flora que suelen habitar bajo las condiciones previas a la construcción del humedal. Sin embargo, el nuevo hábitat hace que dichas comunidades se adapten al mismo, regresando el equilibrio al ecosistema.

3.1.6 Caracterización de aguas de la industria petrolera. Dentro de los contaminantes principales en las aguas de producción de la industria petrolera, se encuentran la DBO₅, DQO, aceites y grasas, sólidos suspendidos, aminas, fenoles, H₂S, trazas de orgánicos y metales pesados. Los tratamientos actuales de la industria permiten una remoción de entre el 60% - 99% de las grasas y aceites; así como entre el 20% - 70% de la DBO₅ y los sólidos suspendidos y del 10% - 60% de la DQO para un tratamiento primario. En un tratamiento secundario se alcanza entre el 40% - 99% de la DBO₅, 30% - 95% de la DQO, 20% - 85% de los sólidos suspendidos, 60% - 99% de fenoles y del 9% - 99% de las aminas. Los humedales construidos comprenden un tratamiento secundario y terciario en potencia, donde es posible lograr la eliminación de las concentraciones remanentes de DBO₅, DQO, sólidos suspendidos, aminas, aceites y grasas, fenoles y metales.

3. 2 OBJETIVOS DEL TRATAMIENTO

Retomando las especificaciones de diseño descritas por Kadlec y Wallace (2009), deben establecerse los principios físicos y matemáticos que modelan las dimensiones y características del humedal. Sin embargo, cada tipo de humedal

tiene unos lineamientos distintos debido a su modo de operación y según el tipo de contaminante analizado, los cuales serán mencionados posteriormente. A continuación, se mencionan aspectos importantes a tener en cuenta y algunos parámetros de diseño a tener en cuenta.

Debido a la crisis mundial del agua, las regulaciones gubernamentales respecto al tratamiento de agua y su posterior disposición han venido ajustándose como medida de prevención y protección ambiental. En algunos casos, estas regulaciones suponen el principal problema para la implementación de un humedal construido. Toda agua tratada debe ser dispuesta en uno de estos tres principales receptores: Aguas superficiales, aguas subterráneas o irrigación. Actualmente en Colombia se tienen regulaciones únicamente sobre las aguas superficiales, especificadas en el Decreto 4728 de 2010. Sin embargo, no existe aún un control sobre las aguas subterráneas ni sobre aguas marinas, lo que es motivo de gran preocupación debido a las posibles descargas con concentraciones muy por encima de las que dichos cuerpos de agua puedan sostener, así como posibles infiltraciones de agua en subsuelo, en el caso de realizar descarga a aguas subterráneas.

En muchos lugares del país y el mundo el agua escasea. A medida que las técnicas de tratamiento de agua mejoran, se ha visto factible la posibilidad de considerar el agua tratada como un recurso, logrando una variedad de campos de acción en donde la agricultura es la predominante en algunos lugares de Estados Unidos.

No obstante, las regulaciones ambientales sobre indistintos tipos de descargas, obligan a cualquier tipo de tratamiento a cumplir con las regulaciones establecidas. Todas las tecnologías de tratamiento, poseen un espectro de las concentraciones de contaminantes a lo largo de un tiempo, que puede ser en días, meses o incluso años. Este espectro suele estar acompañado de un 'ancho de banda' de

concentraciones, que refleja las variaciones que pueden existir en las concentraciones de contaminante en el sistema utilizado. Esto significa que si bien durante un tiempo determinado las concentraciones del contaminante satisfacen las regulaciones ambientales propias del país, pueden existir instantes de tiempo donde la concentración puede ser superior a la permitida, ya sea por factores climáticos en el entorno del sistema o por la temperatura del agua.

Es por esto que durante el diseño de humedales construidos es preciso tener en cuenta este tipo de variable, ya que para cumplir con las exigencias ambientales puede ser probable que se necesite más área en el humedal para poder tratar un posible incremento en las concentraciones de contaminante, generándose un cambio en el diseño. Para corregir este tipo de problemas se usa un *coeficiente de confiabilidad* (COR), dado por la siguiente expresión:

$$\frac{1}{COR} = 1 + \Psi$$

Siendo Ψ un factor de adición dado para cada tipo de humedal. De una u otra forma el COR podría ser considerado como un factor de seguridad en el diseño. Sin embargo, en ingeniería es frecuente realizar diseños que soporten valores inesperados en el humedal, por lo que simplemente se realiza un diseño con un tamaño de humedal de entre un 15% y un 20% adicional al área calculada.

3.3 OTROS PARÁMETROS DE DISEÑO

En Colombia, existen algunos parámetros de diseño que no se encuentran dentro de los habitualmente mencionados en los Decretos y Leyes del Ministerio del Medio Ambiente. Estos parámetros no suelen tener rangos de permisividad en algunos países, como si es el caso de la DBO₅, Sólidos suspendidos, metales,

nitrógenos y orgánicos, entre otros. A continuación se muestran los más representativos:

- **pH:** Normalmente los rangos de pH presentes en las aguas industriales oscilan entre 6 y 9. La mayoría de los humedales construidos utilizados no presentan alteraciones en el pH, por fuera de este rango⁹⁴.
- **Toxicidad:** El vertimiento de sustancias tóxicas está prohibido para cualquier cuerpo de agua en Colombia. Sin embargo, muchos contaminantes del agua de producción tales como metales, amonio o el mismo nitrógeno, aportan un grado de toxicidad en el efluente. Por esta razón es importante monitorear estas concentraciones con el fin de mantener niveles de toxicidad bajos en las descargas.

3.4 CLIMA E HIDROLOGÍA

El diseño de un humedal construido se ve afectado principalmente por la cantidad de agua residual industrial que entra al sistema para ser tratada. El agua a tratar no es el único factor hidrológico del sistema, ya que factores como las precipitaciones anuales, la evapotranspiración o la filtración de aguas del subsuelo deben ser tenidos en consideración. Estos factores mencionados son dependientes de las condiciones climáticas donde se desea implementar el sistema, por lo que un análisis del clima también deberá ser efectuado.

El clima no puede ser controlado al momento de seleccionar determinado HC en un proyecto, pero es importante durante la planeación del mismo ya que afecta el tipo y tamaño del humedal a utilizar. Dadas estas circunstancias es importante obtener suficiente información del lugar donde se desea implementar el proyecto, teniendo en cuenta que dependiendo de la época del año se tendrán rangos de

⁹⁴ KADLEC y WALLACE.Op.cit.

temperatura distintos, así como diferentes porcentajes de precipitaciones fluviales, insolación, evapotranspiración y dirección y velocidad del viento.

La hidrología es el criterio principal para el diseño de un humedal construido. Como ya se mencionó, la hidrología comprende no solo el volumen de agua de entrada al sistema, sino también un balance neto entre la pluviosidad y la evapotranspiración. El diseño de un HC en lugares con altas precipitaciones de lluvia debe tener en cuenta dicho volumen de agua adicional al momento de decidir el tamaño del humedal y las estructuras para el control de flujo y el espaciado en las bermas. Por otra parte, un diseño de un HC en lugares donde la evapotranspiración es considerable debe tener en cuenta las pérdidas de agua en la atmósfera. En algunos casos será necesario permitir el escape de agua del humedal, en donde la filtración pasará a ser una característica importante en la hidrología del humedal y se obtendrán cambios considerables en los cálculos de tratamiento.

3.4.1 Filtración. Normalmente los HC poseen en la parte inferior una capa de material sellante – que puede ser arcilla o una membrana impermeable – en donde se previene la filtración de agua hacia el subsuelo. Sin embargo, existen ocasiones en las que no se considera el uso de material sellante en el humedal por cuestiones de diseño o factibilidad. Cualquier tipo de filtración de agua se da de forma vertical u horizontal, propagándose a lo largo de toda la formación que contiene agua subterránea. Esta filtración representa una pérdida de agua que disminuye el flujo en el sistema y reduce las concentraciones de contaminantes en el cuerpo de agua del humedal.

Durante el flujo a través del subsuelo y en los alrededores del humedal, las aguas infiltradas pueden recibir tratamientos alternativos gracias a la acción de microorganismos que degradan las aguas, o simplemente por adsorción. Esto no significa que los contaminantes que son objeto de eliminación por parte del

humedal sean tratados. Para el diseño de un HC en donde las infiltraciones sean factibles, se puede considerar el sistema como un proyecto de descarga dual, ya que el agua efluente provendrá de dos corrientes separadas (humedal y subsuelo). Es de vital importancia tener conocimiento tanto del cuerpo de agua presente en el humedal como el de subsuelo, ya que en caso de no existir compatibilidad alguna entre ellas, será necesario el uso de material sellante para impedir la filtración a subsuelo.

3.4.2 Temperatura. La temperatura del agua industrial a tratar constituye un factor a tener en cuenta en el diseño, ya que contribuye con el dimensionamiento del sistema para la eliminación de toda clase de nitrógeno presente. Por otro lado, es oportuno mencionar que mediante el Decreto 4728 de 2010, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible estableció los límites máximos permisibles para vertimiento a aguas superficiales, fijando los valores de temperatura a no más de 40 °C respecto al cuerpo de agua receptor, con cambios de temperatura menores a 5 °C en valor absoluto.

3.5 SELECCIÓN DE TIPO DE HUMEDAL

Para la selección del tipo de humedal a usar, hay que tener en cuenta varios factores para el diseño adecuado, así como el tipo de infraestructura y del nivel de tratamiento del agua residual.

3.5.1 Sistema Natural o Ingenieril. El diseño de un humedal de tratamiento puede ser natural o un tanto más complejo, todo depende de que tan alto sea el nivel de eficiencia del sistema gestionado e ingenieril. En esta sección vamos a tener dos estrategias de operación y diseño de humedales *Tipo A* y *Tipo B*.

El sistema *Tipo A*, es el más natural con una demanda de energía baja. Estos tienen un número mínimo de estructuras y pueden ser alimentados por sistemas que aprovechan simplemente el flujo por gravedad, además la vegetación que se usa en este tipo de sistema puede ser recolectada de lugares plenamente naturales.

El sistema *Tipo B*, al componerlo un sistema de bombeo y tuberías complejas, tiene una demanda de energía superior y una mayor ingeniería. En muchos casos pueden tener sistemas de aireado mecánico y la vegetación puede ser muy específica tales como monocultivos.

Los sistemas de humedales *Tipo A* son la solución preferida cuando:

- Hay un tratamiento con gran potencial teniendo un enfoque tipo A.
- El área de terreno es relativamente barata, así que este no es un factor limitante.
- La interacción de humanos no autorizados con el agua del humedal es potencialmente insignificante.
- Los beneficios estéticos y de hábitat sobrepasan las condiciones molestas relacionadas con mosquitos u otro tipo de fauna presente.

El sistema de humedal *Tipo A* se construyen típicamente como pantanos de FS, o FSS de baja tecnología y humedales de tratamiento natural. Estas son siempre de una construcción y operación menos costosa que la de tipo B, dependiendo de la situación.

El diseño y estrategia de administración del sistema de humedal *Tipo B*, es preferido cuando hay uno o más factores limitantes de diseño como los que se mencionaron anteriormente en este capítulo. Ejemplos específicos de humedales de tratamiento *Tipo B* incluyen:

- HCFSSH han aumentado con un medio saturable destinado para remover fósforos o metales.

- Adición de aireadores en construcciones de HCFSSH, para la mejora de la nitrificación.
- Adición de componentes FV a HCFSSH para la mejora de nitrificación (potencialmente con flujo de recirculación).
- Humedales HCFS o HCFSSH y sistema de tratamiento de plantas acuáticas con recolección de plantas.
- Humedales de tratamiento de sólidos con antecámaras de frecuente limpiado o frecuente renovación y reinicio, para camas de lodo.

Los humedales *Tipo B*, pueden ser más costosos en su construcción y operación, comparados con los humedales *Tipo A*.

3.5.2 HCFS o HCFSS? En el transcurso de la corta historia del desarrollo de la tecnología, han sobrevivido dos tipos de sistemas de humedales, los humedales de FS y FSS. En algunos lugares del mundo como Norte América, el que un humedal sea lo más natural posible es muy importante, por razones ecológicas. Aun así, en Europa se tiene el concepto de que los sistemas HCFSSH, tienen una mayor eficiencia que los HCFS.

Un análisis de datos de rendimiento, como los tratados en Kadlec y Knight (1996), sugiere que los sistemas HCFSS no son necesariamente más eficientes que los HCFS. Al estudiar los resultados por tratamiento de área, es muy poca la diferencia entre estos dos sistemas; solo serían importantes estas diferencias si se buscara el tratamiento de un contaminante en específico, puesto que el sistema de tratamiento de HCFS es eficiente para eliminar materia orgánica y nitrógeno mientras que los de FSS alcanzan altas reducciones de coliformes fecales.

En general, el mensaje es que no hay gran diferencia entre la eficiencia de HCFS y HCFSSH. Para una buena selección de tipo de sistema de humedal, hay que tener en cuenta los diferentes factores limitantes, como son los costos, y siendo

así, la selección favorece a los humedales de FSS. Las principales razones de la selección del HCFSS sobre el HCFS, son las siguientes:

- La salud humana a través del contacto con las aguas residuales sin tratar.
- El control de mosquitos.
- Control de olores.
- Reducir al mínimo las interacciones de fauna dentro del humedal.

La salud humana es uno de los parámetros más importantes, es por esto que debe ser insignificante la posibilidad de que exista contacto entre el agua residual sin tratar y las personas de la zona, puesto que la recepción de agentes patógenos es un riesgo alto.

Tanto el control de mosquitos, como el de olores, es una tarea costosa. Las superficies de agua del sistema que se encuentran descubiertas, son perfectas para la acumulación y desarrollo de insectos, lo que podría ser una gran molestia además de tener la posibilidad de propagar enfermedades. Dado que los humedales funcionan con un ciclo vegetativo, que incluye descomposición de materia orgánica, que es una fuente potencial de olores significativos y añadiendo las emanaciones sulfurosas del agua residual, es muy común que estos tipos de olores sean de gran disgusto.

En otras aplicaciones, la vida silvestre representa una amenaza potencial para el funcionamiento del sistema, y puede requerir sobredimensionamiento de los sistemas HCFS para acomodar sus impactos⁹⁵.

3.6 PRE Y POST-TRATAMIENTO

Los humedales construidos se encuentran clasificados dentro de la categoría de tecnologías de tratamiento secundario de aguas residuales. Es por esto que

⁹⁵KADLEC y WALLACE.Op.cit.

necesitan de un tratamiento previo a la entrada al sistema para evitar futuras sobrecargas y el posterior colapso del mismo. Así mismo, los HC también pueden necesitar un tratamiento posterior a su descarga, en caso de no alcanzar los valores estipulados por los entes reguladores.

3.6.1 Pre-tratamiento. Para el tratamiento de aguas residuales industriales, como lo es el agua de producción, los HC deben ser implementados una vez haya sido realizado algún tipo de tratamiento primario convencional, como lo son los separadores trifásicos, tanques desnatadores o CPI's (Corrugated Plate interceptor). Algunas consideraciones deben ser tenidas en cuenta durante el diseño para evitar poner en peligro el correcto funcionamiento del humedal. Entre ellas tenemos:

- **Sólidos en exceso:** La acumulación de sedimentos es uno de los pocos procesos que requieren un mantenimiento periódico en el humedal. Tanto los HCFS como los HCFSS han presentado problemas de colmatación en el lecho, lo que genera la acumulación de sólidos que pueden llegar a formar una capa que impide el paso del agua o cubre la vegetación e inhiben la entrada de oxígeno, ocasionando la muerte de las plantas del sistema. Por esta razón debe diseñarse un sistema que prevenga la sobrecarga de sólidos.
- **Precipitaciones de fósforo:** La eliminación de fósforo no se encuentra dentro de las principales características de los humedales construidos. Sin embargo, si se tienen bajas concentraciones del mismo es posible eliminar o reducir los valores de este elemento. En caso de existir altas concentraciones de fósforo se recomienda realizar un pre-tratamiento con hierro y aluminio al agua afluyente para propiciar la precipitación del fosforo, que será extraído para evitar una posible colmatación del humedal. Una vez removido el fósforo se da inicio al tratamiento con HC.

- **Nitrógeno en exceso:** La presencia de nitrógeno en las aguas de producción de petróleo es variada y usualmente está relacionada con concentraciones de amonio en el agua. El amonio (NH_4) representa una amenaza para la vegetación usada en el humedal, por lo que deben evitarse altas concentraciones de nitrógeno en el sistema.

- **Oxigenación del agua afluente:** El oxígeno forma parte importante de muchos procesos de eliminación de contaminantes del humedal, como es el caso de la DBO_5 . Es por esto que se sugiere la implementación de tratamientos de pre-oxigenación del agua, para dinamizar los procesos de eliminación de contaminantes.

3.6.2 Post-tratamiento. Como post-tratamiento para las aguas residuales de la industria del petróleo, no hay requerimiento alguno en materia de contaminantes, pero si en materia ambiental. En caso de que se desee verter en vez de disponer el agua, es necesario tener en cuenta los niveles de oxígeno disuelto.

Los ríos, lagos y demás cuerpos de agua superficiales del mundo son ricos en oxígeno disuelto, lo que permite que gran variedad de especies habiten en ellos, tanto fauna como flora. Es por esto que las aguas que sean vertidas en estos ecosistemas deben cumplir con requisitos mínimos de oxígeno disuelto, que en algunas ocasiones no logran satisfacer. En caso de ser necesario, deben ser realizados procesos de aireación del agua efluente para enriquecerla en oxígeno y así poder ser vertidas en cualquier cuerpo de agua superficial. Dentro de los procesos de aeración más comunes se encuentra la recirculación del agua mediante cascadas.

A lo largo del capítulo 3, se describieron todos los aspectos, parámetros, variables y recomendaciones necesarias para un diseño adecuado de un humedal construido. Una variación en los valores de alguno de estos factores puede incidir notablemente en el tamaño del humedal y, por consiguiente, caer en un diseño errado del sistema.

De acuerdo con lo descrito a lo largo de este capítulo y basados en las características de cada tipo de humedal construido, mencionadas en el capítulo 2, se puede concluir que los humedales de flujo superficial (HCFS) representan un sistema de tratamiento terciario adecuado para la restauración de ambientes y la creación de zonas húmedas que facilitan el desarrollo de fauna y flora. Sin embargo, para la industria petrolera, el hecho de transportar aguas industriales a la intemperie, hace que el uso de humedales superficiales represente desventajas a la hora de buscar una implementación como sistema de tratamiento en aguas industriales del petróleo. La fácil generación y reproducción de mosquitos y la propagación de malos olores puede generar problemas de salud pública en las zonas aledañas al campo, debido a que el sistema debe ser implementado en zonas de constante tránsito de personal de las operadoras, adicional a los costos que implicaría la mitigación de los problemas mencionados.

Con base en lo anterior, se propone el diseño de un humedal construido de flujo subsuperficial (HCFSS) para el tratamiento del agua de producción del campo de petróleo colombiano en estudio, debido a las ventajas de este sistema en materia ambiental y a las altas eficiencias de eliminación de contaminantes demostradas como tecnología de tratamiento secundario.

4. DISEÑO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL (HCFSS)

El diseño de los humedales construidos de flujo subsuperficial se encuentra dividido en dos grandes grupos: en el primero se realizan los cálculos del tamaño del humedal, donde se mencionan los diferentes métodos utilizados según la clase de agua residual a ser tratada por el sistema. El segundo grupo analiza las especificaciones físicas que afectan el desempeño del sistema, tales como número de celdas, lugares de disposición, tiempo de retención, profundidad del lecho y plantas a utilizar, entre otros.

Como se mencionó en el capítulo 2, los humedales construidos de flujo subsuperficial pueden ser de flujo horizontal (HCFSSH) o vertical (HCFSSV). Los HCFSSH requieren como mínimo un sistema de tratamiento primario, previo a la entrada al humedal, con el fin de remover de forma eficiente los sólidos suspendidos y precipitados en el lecho. Por su parte, los HCFSSV pueden no requerir un tratamiento previo, aunque la decisión de implementarlo o no es dependiente de la clase de agua a tratar y de las concentraciones de contaminante en la misma.

4.1 CÁLCULO DEL TAMAÑO DEL HUMEDAL

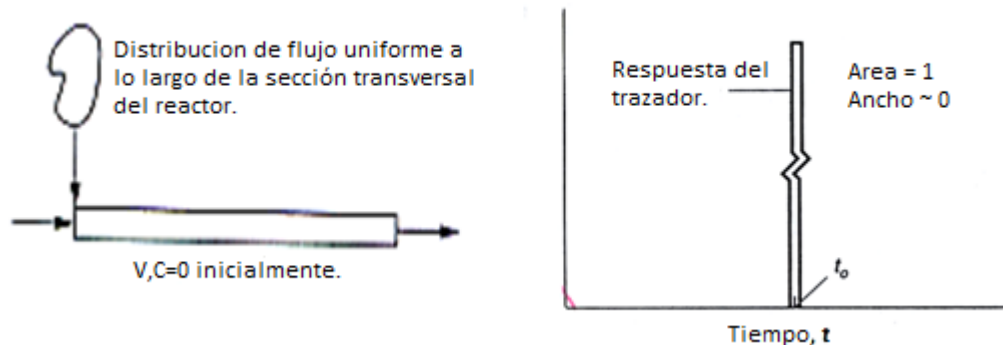
Los humedales construidos han sido utilizados principalmente en el tratamiento de aguas residuales domésticas durante los últimos 50 años. Con el paso del tiempo y observando el buen desempeño que mostraban, se fue incursionando en la posibilidad de tratar aguas residuales con otras características. Es por esto que a lo largo del tiempo el método más utilizado para el cálculo del tamaño del humedal es el criterio prescriptivo. Este método consiste en asociar – como una aproximación – el tamaño del humedal con un parámetro que probablemente será el más influyente a lo largo del desarrollo del proyecto. Este parámetro puede ser

el caudal de entrada, el tiempo de retención o el número de secciones a utilizar; la selección del parámetro se realiza gracias a la gran cantidad de información obtenida en los registros de contaminantes del agua doméstica, donde dicho parámetro en específico condicionará el funcionamiento del humedal.

De esta manera, el método del criterio prescriptivo permite calcular de forma simple el tamaño del humedal de flujo subsuperficial. Sin embargo, para utilizar este método es necesario tener suficiente información del comportamiento de los contaminantes de entrada al sistema, donde se incluyen gráficos de rendimiento que no son usuales en otro tipo de aguas residuales, como las provenientes de la industria del petróleo. Es por esto que para el cálculo del tamaño del humedal en otros tipos de aguas 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 $P-k-C^*$.

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 (figura 4) o una combinación de este 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.

Figura 4. Esquema del comportamiento de un reactor de flujo en pistón para predecir el transporte de partículas y el rendimiento en la eliminación de contaminantes.



El modelo se diferencia de los habituales criterios prescriptivos en varios factores favorables para los HCFSSH, dentro de los que se encuentran:

- El método prescriptivo no puede obtener perfiles internos de la reducción de contaminantes dentro del sistema.
- El método P-k-C* permite modelar la eliminación secuencial de contaminantes, tales como el nitrógeno.

4.1.1 Método P-k-C* aplicado a HCFSSH. Los lineamientos establecidos a continuación constituyen una recomendación de diseño basados en Kadlec y Wallace (2009). Por consiguiente, no representan un método único para la construcción de humedales ingenieriles. Como se mencionó en las especificaciones de diseño (capítulo 3), los factores climáticos e hidrológicos condicionan notablemente los parámetros que conforman el tamaño del humedal.

4.1.1.1 Establecer las condiciones de entrada al humedal (afluente). La caracterización del agua de producción a la entrada del humedal es el principal aspecto a tener en cuenta. Dependiendo de la concentración de cada contaminante se toma una decisión respecto a cuál o cuáles de ellos serán los que

determinaran el tamaño del humedal. En la tabla 1 se describieron los contaminantes y sus concentraciones habituales reportadas para aguas industriales del petróleo.

Es importante recordar que ningún cuerpo de agua es igual a otro, por lo que los valores mostrados en la tabla 1, corresponde a una descripción general de los contaminantes que suelen estar presentes en aguas de producción de petróleo.

4.1.1.2 Establecer las condiciones de salida del humedal (efluente). Como segundo paso se debe especificar cuáles son las concentraciones de salida del agua de producción. Para el caso de Colombia, se deben tener en cuenta las regulaciones establecidas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS⁹⁶, para descarga a aguas superficiales, las cuales fueron descritas en la Tabla 2.

4.1.1.3 Establecer el caudal de entrada y la filtración al subsuelo. Obteniendo datos de producción del campo deseado, se puede calcular el caudal promedio de agua entrante al sistema. Por su parte, la filtración puede generarse tanto hacia el subsuelo como desde éste al humedal, como se describió en el capítulo 3. Sin embargo, los efectos de la filtración se despreciaran en caso de usar membranas impermeables debajo del lecho granular del humedal.

4.1.1.4 Determinar los valores de precipitación y evapotranspiración de la zona de influencia del humedal. Como se mencionó en el capítulo 3, las lluvias y los cambios de temperatura en los lugares donde se implementa la tecnología son influyentes en el volumen de agua presente en el humedal. Por esta razón, conocer de antemano estas variables climáticas permite realizar un diseño aproximado con base en la carga de agua dentro del humedal durante los

⁹⁶ Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, Op.cit.

procesos de eliminación de contaminantes. Usualmente estos parámetros son brindados por entidades especializadas en meteorología.

4.1.1.5 Seleccionar el valor de k para el/los parámetro(s) seleccionado(s). En el primer paso se especificó la necesidad de seleccionar uno o más parámetros que serán determinantes en el diseño del humedal. Una vez dichos parámetros han sido seleccionados, el coeficiente de área k debe ser determinado. Para determinar este coeficiente es necesario realizar pruebas piloto de humedales que permitan ver los comportamientos de los parámetros a analizar durante un tiempo determinado. Sin embargo, k es función de variables climáticas como la temperatura, por lo que es posible analizar comportamientos en zonas con temperaturas similares donde hayan sido implementados proyectos piloto. Así mismo, la ecuación 1, que expresa la constante k y en resumen, todo el método P- k - C^* , se muestra a continuación:

$$Ec. 1 \quad \left(\frac{C - C^*}{C_i - C^*} \right) = \frac{1}{\left(1 + \frac{K}{Pq}\right)^P} = \frac{1}{\left(1 + \frac{K_V \tau}{P}\right)^P}$$

Donde:

- C = Concentración de salida, mg/L
- C_i = 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
- K_V = Coeficiente volumétrico de primer orden, d^{-1}
- τ = Tiempo de retención, d

4.1.1.6 Seleccionar el valor-P (TIS). Puesto que P incorpora tanto la eficiencia hidráulica (numero de TIS) como el efecto de los contaminantes, el valor-P seleccionado puede no ser el mismo para todos los parámetros.

En el campo de la ingeniería petrolera, es conveniente que el valor-P seleccionado, este dentro del rango de “3-6”, con el fin de tener una mejor eficiencia de tratamiento⁹⁷.

4.1.1.7 Seleccionar los parámetros C* para los parámetros específicos. El valor de C* es dependiente del nivel de concentración de DBO existente en el agua. Las plantas que se usan en el humedal tienen la tendencia a generar concentraciones de materia orgánica, que aumenta el nivel de DBO en el agua, por lo que la remoción de este parámetro en el periodo de tratamiento dentro del humedal no va a ser completo. Esta concentración residual que permanece en el agua es a lo que se llama valor de C* y debe encontrarse por debajo del nivel permitido por las entidades reguladoras⁹⁸.

En la tabla 7, se muestran valores de C*, teniendo en cuenta rangos de concentraciones iniciales de DBO.

Tabla 7. Concentración de fondo C*, basado en la concentración de entrada de DBO.

	TERCIARIO	SECUNDARIO	PRIMARIO	SÚPER
C _i (mg/L)	3-30	30-100	100-200	>200
C* (mg/L)	1	5	10	15

Fuente. Modificado de: KADLEC y WALLACE. (2009)

⁹⁷ WALLACE, S. y DAVIS, B. Engineered Wetland Design for On-Site Bioremediation of Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Groundwater and Wastewater. SPE 111515-MS. 15-17 Abril 2008. En: Onepetro [base de datos en línea].

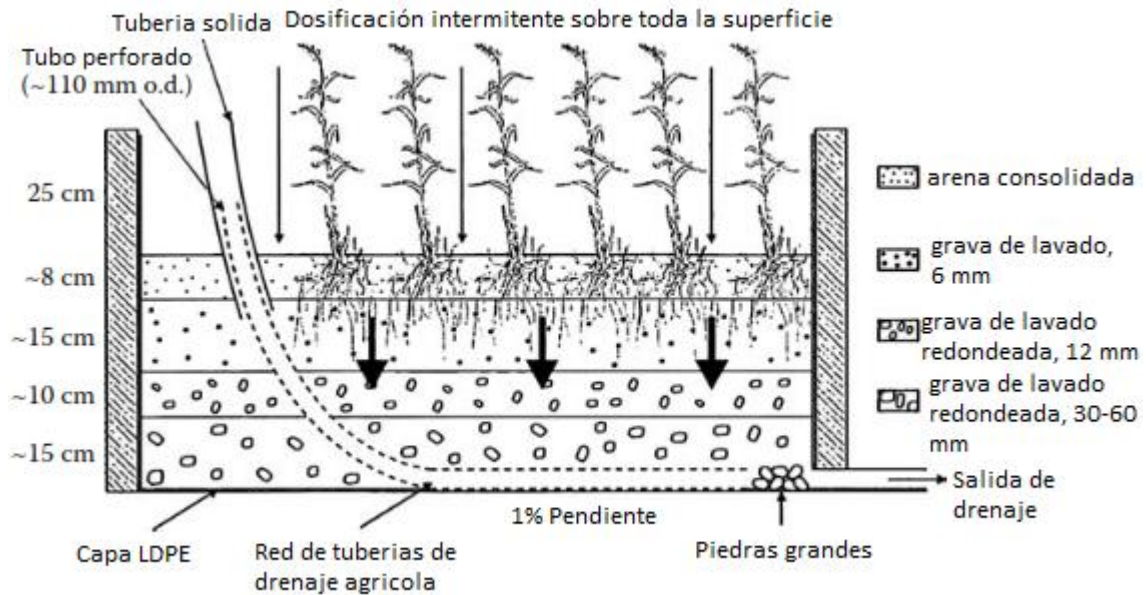
⁹⁸ Ministerio de medio ambiente. Decreto 4728. Op.cit.

4.1.2 Método P-k-C* aplicado a HCFSSV

La determinación del tamaño del humedal en humedales de flujo vertical es en cierta forma similar al flujo horizontal. Sin embargo, la principal diferencia radica en la realización de ciclos de llenado y vaciado del sistema en el flujo vertical. Esto implica la detención de la entrada de agua al humedal por periodos de tiempo para permitir la eliminación de contaminantes. Así mismo, los HCFSSV poseen en su estructura tuberías de aireación que permiten la entrada de oxígeno al lecho, favoreciendo la oxidación de contaminantes en un medio aeróbico. Por consiguiente, al haber mayor presencia de oxígeno en el humedal, la tecnología de flujo vertical (FV) es una alternativa potencial para la eliminación de amonio a través de la nitrificación.

La nitrificación en los humedales de flujo vertical, se da por medio de un sistema natural compuesto de vegetación, con filtros de arena intermitentes, lo suficientemente húmedos para soportar las plantas del humedal. En la figura 5 se observa el segmento de un sistema de FV.

Figura 5. Disposición típica de un humedal construido de FV



Fue

nte. Modificado de Kadlec and Wallace (2009)

El lecho está constituido por capas de grava graduada y plantas específicas plantadas en su superficie. Las macrófitas u otras plantas que crecen en el lecho, proveen un ambiente propicio para la generación de microorganismos y ayudan a mantener la conductividad hidráulica del lecho. Las bacterias que crecen en las partículas de la grava del medio, remueven la DBO y ayudan a la nitrificación. Adicionalmente, pueden adsorber amoníaco mientras desciende el flujo, después de la nitrificación en el periodo de drenaje.

El agua residual a tratar es dosificada intermitentemente en la superficie del lecho y se drena hacia abajo a través del lecho donde es recolectada por una red de drenaje en la base. Cuando el lecho se ha drenado por completo, permite que se oxigene para volver a recargarlo y en la siguiente dosis de liquido se tenga una trampa de aire que permite mejorar la transferencia de oxígeno y por lo tanto la capacidad de nitrificación.

La frecuencia de dosificación debe ser programada de tal forma que la dosis anterior ha tenido el tiempo suficiente para filtrarse a través del lecho y de este modo los espacios vacíos sean rellenados con aire. De esta forma, la diferencia principal en el diseño de humedales de flujo vertical es la selección del volumen de agua a ingresar al sistema por ciclo, además del número de ciclos.

4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Una vez calculada el área requerida por el humedal para el tratamiento del agua de producción, se debe realizar la implementación del sistema. Implementar el sistema. Es decir, estructurar tres fases de desarrollo: (1) realización del diseño físico del humedal, (2) construcción del humedal y (3) puesta en marcha del sistema. Durante la primera fase se toman decisiones tales como el número de celdas a dividir, nivelar el suelo donde se construirá el sistema, determinar la relación de aspecto y la clasificación de tuberías internas, entre otros. En la segunda fase se realizan todos los procesos legales para la adecuación del

sistema, además de su construcción. Por último, la puesta en marcha comprende el inicio y evaluación del tratamiento del agua de producción.

4.2.1 Diseño físico. Además de las condiciones requeridas por el humedal respecto a su ubicación, mencionadas en el capítulo 3, existen otras características a tener en cuenta para iniciar la construcción del humedal. Cabe recordar que los sistemas de flujo subsuperficial son más pequeños que los de flujo superficial y, por consecuencia, suelen ser construidos cerca a lugares con infraestructura definida, como en el caso de las estaciones de recolección, ubicándose en las proximidades del manifold y todo el sistema de tratamiento de fluidos de producción.

4.2.1.1 Accesos. Al igual que en un proyecto de exploración y explotación petrolera, los humedales construidos requieren de la adecuación de vías de acceso para la entrada de la maquinaria de construcción necesaria para la instalación del sistema. Debe diseñarse un plan de manejo territorial que considere la adecuación de lugares para deposición del suelo extraído en la excavación, la separación en el perímetro del humedal para la fácil circulación de maquinaria (las distancias típicas manejadas son entre 5 y 7 metros) y muros de contención, en caso de realizar excavaciones profundas.

4.2.1.2 Pendientes. Los humedales de flujo subsuperficial necesitan de pendientes para favorecer el flujo hidráulico por gravedad. Por esta razón, suelen ser preferidos lugares con cierta inclinación por sobre otros donde no existe pendiente alguna. Al no existir pendiente, es necesario realizar cortes más profundos para obtener una mayor profundidad aguas arriba, y a su vez rellenar con suelo en las zonas aguas abajo para alcanzar la inclinación deseada,

aumentando considerablemente los costos de construcción. En ingeniería se suelen manejar pendientes de entre el 1% y el 3%.

4.2.1.3 Sistemas de tratamiento existentes. En lugares donde existan sistemas de tratamiento previos, tal como sucede en las facilidades de superficie de la industria petrolera, se debe tener especial cuidado en la ubicación del sistema en caso de existir tratamientos con instalaciones subterráneas. Esto con el fin de evitar daños en otros sistemas durante los procesos de excavación.

4.2.1.4 Configuración y Disposición. Una vez seleccionada el área y la locación donde será implementado el humedal, se deben tener algunas consideraciones respecto a la configuración y disposición del humedal. Entre estas consideraciones se tienen:

- **Número de trayectorias de flujo en paralelo.** La decisión de tomar 2 o más trayectorias de flujo en paralelo depende de la necesidad que se tenga, la cual puede ser de índole operacional, de tratamiento, o, si se desea, operar un sistema por ciclos de llenado y vaciado (flujo vertical).

A nivel operacional, se puede conseguir una mayor flexibilidad en el funcionamiento del humedal si se diseñan múltiples trayectorias de flujo en paralelo. Al tener múltiples trayectorias de flujo, los caudales entrantes al sistema pueden ser dosificados en las trayectorias divididas, facilitando el tratamiento y mejorando la eficiencia de eliminación. Así mismo, en actividades de mantenimiento es de gran utilidad tener múltiples trayectorias ya que mientras una celda esté en mantenimiento, el caudal de entrada a ésta, puede ser repartido en las otras secciones. Este tipo de organización del sistema es usual en humedales extensos, donde la repartición del área es económica y practica. Por el contrario, en humedales pequeños, como para residencias domesticas, se suele usar una

única trayectoria de flujo debido a los gastos innecesarios que implica la compra de múltiples membranas, material granular, etc.

A nivel de tratamiento, se suelen diseñar los sistemas con cierta redundancia en su eficiencia. Esto porque muchas entidades reguladoras solicitan un diseño sobredimensionado en su tratamiento exigiendo como mínimo dos trayectorias de flujo, en donde cada trayectoria de flujo debe operar al menos el 75% de la capacidad de la otra, es decir, una celda debe ser capaz de tratar un 87,5% del caudal total de entrada, en caso de que una de las dos sea sometida a mantenimiento o suspenda su operación. En Colombia, el grado de conocimiento de esta temática, aun está en proceso de desarrollo y todavía no existe una normativa vigente para actividades específicas como la industria del petróleo.

- **Numero de humedales y su respectivo tipo en cada trayectoria de flujo.**

Una vez es establecido el número de trayectorias de flujo en paralelo para el sistema, el paso a seguir es establecer cuantas celdas habrá en cada trayectoria, así como qué clase de humedal se utilizara en ellas. Para esto, se pueden manejar diversos puntos de vista, tales como: (1) existe la necesidad de incrementar el número aparente de tanques en serie – P – para mejorar la eficiencia, a través de dos o más celdas en serie, (2) en el lugar de implementación se tiene suficiente pendiente como para dividir cada trayectoria en múltiples celdas, sin afectar considerablemente la hidráulica del sistema y siendo viable desde una perspectiva propia de ingeniería civil, (3) se desea usar más de una clase de humedal en el tratamiento o (4) se desea realizar un tratamiento seccionado, propiciando diferentes reacciones en cada celda.

El primer punto de vista mencionado se considera un escenario en el que se desea incrementar la eficiencia de tratamiento aumentando el número de celdas en serie. Diversos estudios realizados por Kadlec and Wallace (2009) han demostrado que no se consigue una alta eficiencia aumentando el número de celdas, a menos que las concentraciones de salida deseadas sean muy cercanas

a la concentración de fondo, C^* . Dos celdas en serie es lo usualmente usado para el tratamiento de DBO_5 como contaminante.

El segundo escenario, está basado principalmente en el perfil topográfico que se presente en toda el área de influencia del humedal. Debe tenerse en cuenta que al seccionar el humedal se tendrán múltiples cuadrantes con suelos que pueden ser distintos de un punto a otro.

En la tercera perspectiva se piensa en los denominados “sistemas híbridos”, mencionados en el capítulo 2. Este tipo de sistemas no son objeto de estudio de este trabajo.

Por último, la asignación de celdas buscando múltiples tratamientos ha sido implementada en algunas partes de Europa, en donde suelen implementar pares de celdas para el tratamiento de dos o más contaminantes por par.

4.2.1.5 Colmatación. Ambos tipos de humedales de FSS (horizontales y verticales) son susceptibles a que el lecho sufra de colmatación (obstrucción) cuando el agua a tratar atraviesa el medio poroso, restringiendo el flujo de la misma. En muchos casos, esta restricción se define como un fracaso del sistema de tratamiento en caso de llegar a generarse la inundación del humedal. Sin embargo, el concepto de fracaso está sujeto a la percepción de los responsables directos de cada localidad, como los operadores del sistema, usuarios del mismo, agentes reguladores de la localidad, etc.

Como se menciona, el concepto de fracaso es un término subjetivo al momento de referirse a humedales construidos. Sin embargo, podrá considerarse un fracaso hidráulico del humedal en algunas situaciones, tales como:

- La incapacidad de cumplir los estándares normativos de un sistema de tratamiento de forma consistente, durante la vida del proyecto.

- En los humedales de FSSH el agua debe atravesar el lecho de este, cuando ocurre la colmatación, la entrada de fluido es restringida, haciendo que cualquier ruta de flujo por la superficie del lecho sea preferente para el agua.
- Para los humedales de FV, con la colmatación se les presenta una incapacidad de pasar hidráulicamente el flujo pre-escrito por el diseño, haciendo que haya la necesidad de contar con los lechos suficientes, para permitir periodos de descanso que puedan resistir la obstrucción.

Colmatación en lechos de humedales de FSSH

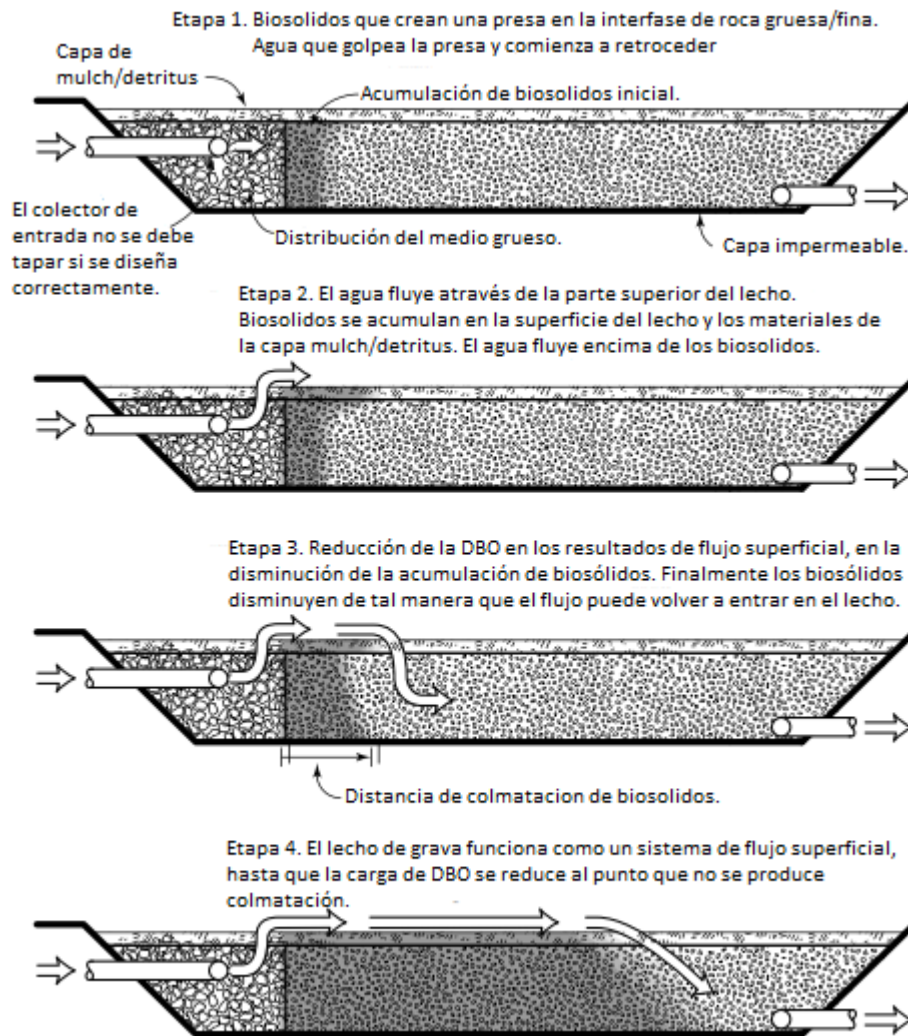
El concepto de proporción de cada celda del humedal es una importante decisión en el diseño de HCFSSH. Con lechos más largos y más estrechos (mayor relación largo-ancho), aumenta la carga orgánica aplicada al área de sección transversal del lecho⁹⁹. Debido a la colmatación, las altas cargas transversales se verán reflejadas en una mayor longitud del lecho, que cada vez mas parecerá un sistema de flujo superficial, como se muestra en la figura 6. En algunos países como Estados Unidos¹⁰⁰, esto es inaceptable y si el flujo superficial se canaliza, puede comprometer el rendimiento del sistema de tratamiento.

En la actualidad, es de gran interés el determinar si es posible tener un equilibrio sostenible entre la deposición de sólidos y la descomposición de estos, en la entrada del lecho. Si este criterio es identificado, los HCFSSH pueden ser diseñados con suficientes criterios conservadores de carga de entrada, de modo que se evite la necesidad de mantenimiento o sustitución de capas del lecho. Si la obstrucción del lecho es inevitable, la necesidad de mantenimiento o sustitución de la zona de entrada al lecho, se convierte en una parte integral de los HCFSSH y de sus costos de vida.

⁹⁹ Kadlec y Wallace. Op.cit , p. 742

¹⁰⁰ Ibid.

Figura 6. Etapas de colmatación en lechos de humedales de FSSH



Fuente. Modificado de Kadlec and Wallace (2009)

Para alcanzar un estado estable en la zona de entrada del lecho, la deposición y generación de materia orgánica debe estar en equilibrio con la tasa combinada de descomposición de sólidos y re-suspensión de partículas. Esto implica que la tasa de acumulación, A , en la zona de entrada, sea cero.

En la ecuación 2, se ve representada esta condición:

$$\text{Ec. 2} \quad G + S = D + R$$

Donde:

- G = tasa de generación, $\text{g/m}^2\text{d}$
- S = tasa de asentamiento, $\text{g/m}^2\text{d}$
- D = tasa de descomposición de sólidos transportables, $\text{g/m}^2\text{d}$
- R = tasa de re-suspensión, $\text{g/m}^2\text{d}$

La reducción de la conductividad de la zona de entrada al lecho se atribuye a una variación de mecanismos, que incluyen:

- La acumulación de sedimentos minerales asociados con SST del afluente.
- La acumulación de partículas de materia orgánica (sujeto a la biodegradación) dentro de la zona de entrada.
- La formación de precipitados químicos dentro del lecho.
- Generación de biopelículas microbianas en respuesta a la carga combinada de las partículas y la materia orgánica soluble.

4.2.1.6 Configuración de las celdas. Tal como se vio en el numeral anterior, en la mayoría de las ocasiones el número de celdas a distribuir en el humedal dependen de la colmatación en potencia dentro del sistema. De igual manera, para HCFSSH, las dimensiones de cada celda – denominado “relación largo-ancho” – es un factor de la carga contaminante en la sección transversal del humedal, el cual está determinado por los caudales de flujo máximos en la parte

superficial del sistema (en caso de presentarse colmatación). Sin embargo, existen aún, múltiples decisiones por tomar respecto a la configuración de las celdas, como el cálculo de la relación largo-ancho, la profundidad del lecho en cada celda, los tipos y tamaños de material granular a utilizar y el tamaño global de las celdas.

- **Relación largo-ancho.** La relación largo-ancho no es un factor determinante para humedales de flujo vertical, ya que en estos los periodos de llenado suponen una saturación total del sistema, independiente de sus dimensiones. Sin embargo, en humedales de flujo horizontal, la relación es un factor decisivo porque permite determinar las cargas en la sección transversal del humedal y la velocidad de flujo. Para estos casos, dos alternativas de diseño son desarrolladas: (1) tomar relaciones largo-ancho cercanas a “1” para maximizar el área de distribución de flujo, con el fin de prolongar el tiempo de colmatación del sistema, o (2) esparcir el flujo de entrada sobre la sección transversal vertical para mejorar la distribución de flujo, mediante celdas con mayor largo que ancho.

- **Profundidad de las celdas.** En los inicios de la tecnología, los diseñadores planteaban la profundidad de las celdas en 60 cm, basados en la creencia de que esta medida era la máxima profundidad a la que las plantas macrófitas podían extender sus raíces. Sin embargo, estudios posteriores en humedales de flujo horizontal comprobaron que la eficiencia de tratamiento en plantas piloto mejoraba si se tenía una profundidad inferior, usualmente de 30 cm, debido a que con una profundidad mayor, el afluente tendía a circular por el fondo del lecho impidiendo la absorción de nutrientes por parte de las raíces de las plantas.

De acuerdo con lo anterior y basados en implementaciones recientes, la profundidad de las celdas en HCFSSH se encuentra entre 30 y 60 centímetros, siendo consideración del diseñador la profundidad a elegir. Por otro lado, para

humedales de flujo vertical se suelen seleccionar profundidades de entre 50 y 80 centímetros.

- **Tipo y tamaño del medio granular.** En humedales de flujo horizontal se suelen usar dos tipos de material granular en el sistema global. En primer lugar, en las zonas de entrada y salida de agua se suelen usar piedras gruesas o gravas con espesores de entre 25 y 50 milímetros. Por su parte, en la zona media del sistema se utiliza grava con diámetros superiores a los 4 milímetros¹⁰¹. De igual manera, es común ver humedales contruidos con arena como material granular en la zona media; sin embargo, la implementación de arena es recomendada en aguas con bajas concentraciones de materia orgánica, porque de lo contrario es probable la colmatación del sistema.

En humedales de flujo vertical el manejo del material granular es distinto debido al régimen de flujo del sistema. En estos, se manejan materiales con finos en la parte superior del sistema (arena – grava de diámetro pequeño), mientras en fondo se usa material grueso, con diámetros superiores a los 40 mm¹⁰². Esto genera la formación de estratos con distinta porosidad en el mismo sistema.

- **Tamaño global de las celdas.** Durante la construcción de las celdas se pueden presentar problemas respecto al ancho que puede tener el humedal. El ancho puede variar entre los 10 y los 20 metros, haciendo difícil en algunas ocasiones la incursión de la maquinaria necesaria para su delimitación. Más adelante en este mismo capítulo se discutirán las variables a analizar en el tamaño de las celdas de humedales contruidos durante la construcción.

4.2.1.7 Hidráulica de HCFSS. El conocimiento de la hidráulica dentro de los humedales contruidos es un factor determinante para conseguir los objetivos planteados en el diseño y durante su implementación. Inicialmente la tendencia

¹⁰¹ Ibid.

¹⁰² Ibid.

que se busca en el comportamiento hidráulico del sistema es el de un flujo gravitacional gracias al uso de pendientes. Esto permitiría un flujo natural del humedal y evitaría así el uso de bombas para la circulación de los caudales, lo cual causaría un costo adicional considerable debido a la compra de bombas y el consumo energético.

Así mismo, un flujo gravitacional debe ser controlado con la intención de mantener un régimen de flujo laminar dentro del sistema, que podría ser modelado fácilmente por la ley de Darcy. Para esto, los diferenciales de altura entre celdas producto de la pendiente deben ser bajos y el flujo debe ser extendido en un área suficiente para mantener una velocidad de flujo no tan alta, para que no implique la generación de un flujo turbulento, pero no tan baja, con el fin de evitar problemas de colmatación en el humedal, así como la muerte de plantas macrófitas que no logran acceder al agua del lecho.

A nivel de control de flujo, se deben tener en cuenta algunos requerimientos del sistema, tales como: (1) el caudal de entrada debe circular a través del lecho granular, sin llegar a la parte superior del humedal, (2) el flujo debe pasar por la zona de presencia de plantas (raíces) sin llegar a cubrirlas de agua por un tiempo prolongado, ya que puede causar la muerte de estas, (3) la operación debe mantenerse en un nivel aceptable, incluso si existe colmatación e inicia una circulación en la superficie, (4) el lecho debe ser drenable, (5) los niveles de agua en el sistema serán controlados en su totalidad mediante el uso de las estructuras de entrada y salida de flujo y (6) la configuración del flujo debe generarse en los límites de área establecidos en el diseño.

En general, para obtener un perfil hidráulico adecuado en humedales de flujo subsuperficial, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La cabeza de accionamiento necesaria para distribuir el afluente.
- Las pérdidas por fricción con el material granular.
- Los diferenciales de altura en todas las etapas del tratamiento.

- Si se desea un flujo gravitacional, la profundidad del lecho.
- El control de flujo del sistema

Todas las ecuaciones y principios que modelan el comportamiento hidráulico de los humedales construidos se especifican en el anexo 1.

4.2.1.8 Distribución y mantenimiento del flujo. Cualquiera de los dos tipos de humedales de flujo subsuperficial requiere de un arreglo en la distribución de flujo del sistema, teniendo como objetivo principal el mantener un flujo lo más uniformemente posible a lo largo de toda su extensión.

- **HCFSSH.** En humedales de flujo horizontal, la distribución de los caudales de entrada al sistema deben ser realizados de manera que se obtenga una uniformidad en el flujo del humedal, como se dijo anteriormente, pero también buscando una distribución equitativa de las cargas de materia orgánica en el mismo. De acuerdo con lo anterior, en los Estados Unidos se han desarrollado dos grandes métodos para la distribución de flujo: tuberías perforadas con juntas rotatorias y las cámaras de infiltración.

Las tuberías con juntas rotatorias comprenden un arreglo de tubos, que pueden ser PVC, perforados en diferentes zonas para la distribución del flujo. Una de las ventajas más notorias de este método es que permiten ajustar la elevación de cada punto de descarga de forma individual a través de las juntas, facilitando la uniformidad del flujo. Como desventaja se encuentra la posible colmatación a la salida de las áreas perforadas debido a altas concentraciones de materia orgánica, y la inoperancia del sistema en lugares fríos. En la figura 7, se muestra un arreglo de un humedal de este tipo:

Figura 7. HCFSSV con un arreglo de tuberías perforadas con juntas rotatorias para distribución de flujo en Middlebury, Indiana. 2011



Fuente. Cortesía de Sergio Díaz Caselles.

Por su parte, las cámaras de infiltración permiten una mayor distribución de la carga orgánica que las tuberías perforadas, ya que usan paredes laterales con “persianas” que optimizan dicha distribución; también existen arreglos en forma de ‘T’ que reducen la carga orgánica en la entrada, pero suponen una distribución desigual en los otros sectores del sistema. En la figura 8, se muestra un ejemplo de las cámaras de infiltración instaladas en una planta de tratamiento en la comunidad catalana, España.

Figura 8. Cámara de infiltración en la entrada de un HCFSSH en Alfes, Cataluña.



Fuente. Cortesía de Aracelly Caselles Osorio.

- **HCFSSV.** La distribución de flujo en humedales de flujo vertical está dada principalmente por las tuberías perforadas, en un arreglo muy similar al de la figura 7. Sin embargo, el objetivo principal de este arreglo es el de llenar lo más rápido posible el volumen del lecho, con el fin de iniciar los ciclos de tratamiento. Para que esto sea posible es necesario el uso de bombas hidráulicas especiales (deben ser resistentes al constante paso de materia orgánica y otros contaminantes a través de ella) que logran un llenado del lecho en menos de 15 minutos.

Por esta razón y como se ha visto frecuentemente desde el inicio de este capítulo, las características de los HCFSSV y los arreglos de implementación que este requiere muestran lo poco viable que son para el tratamiento de aguas industriales del petróleo, más específicamente para aguas de producción. Al ser un sistema cíclico en el que es necesario detener la entrada de flujo al sistema por períodos de tiempo y al necesitar bombas para la distribución de flujo, muestran que para

los campos de petróleo, en donde la producción de agua es constante e ininterrumpida, y en busca de menores costos de operación y mantenimiento, los HCFSSV no suponen una alternativa viable para el tratamiento de aguas de producción.

Por consiguiente, a partir de este momento se enfocará el estudio de diseño de un humedal construido para tratar aguas de producción de un campo colombiano al uso de HCFSSH como alternativa más viable.

- **Recolección del efluente.** La recolección del efluente en HCFSSH es relativamente sencilla, basta con la instalación de tuberías perforadas en la parte posterior del sistema, en donde la posibilidad de colmatación es mínima debido al tratamiento previo realizado en el sistema.

- **Control del nivel de agua.** El operador siempre debe tener el control del nivel del agua en HCFSSH. Los objetivos generales de este control son: (1) mantener el nivel del agua por debajo de la superficie del lecho y (2) administrar el nivel del agua, de manera que se mantenga en la rizosfera de las plantas macrófitas presentes en el humedal.

Para dicho control se usan estructuras que poseen un amplio rango de ajuste, en donde para sistemas de tamaño intermedio, como en campos de producción, se usan placas apiladas.

4.2.1.9 Membranas de Impermeabilización. La implementación de membranas para adecuar un sistema de HCFSSH puede ser con material sintético o con el uso de arcillas, que son ampliamente conocidas por su capacidad como sellante. La selección de la membrana es siempre una función de la disponibilidad de materiales en la zona de implementación del sistema, por lo que el diseñador decidirá al respecto. Existen membranas de PVC (0.76 milímetros de espesor),

polietilenos de alta densidad (HDPE – 1.1-1.5 milímetros), monómeros de dienopropileno etileno (EPDM – 1.5 milímetros) y mantas geosintéticas cubiertas con bentonita.

4.2.2 Construcción. La construcción de un HCFSSH, es una fase crucial en el proceso de implementación. Esta fase requiere la preparación de documentos necesarios para la construcción, como contratación del constructor o los documentos de diseño. El tener un claro entendimiento y correcta ejecución de los documentos del diseño es muy importante para evitar posibles errores en cualquiera de las etapas de construcción, ya que el tener que corregir estos problemas, supone costos mayores para el proyecto.

Como no existen suficientes construcciones de humedales de tratamiento, los contratistas de construcción a menudo no están familiarizados con el sistema e incluso no tienen un buen entendimiento de éste. En términos generales, el proceso de construcción es más exitoso cuando el diseñador del humedal actúa como puente para la supervisión de los diferentes modos de construcción y puesta en marcha del proyecto. La figura 9 muestra un ejemplo de un humedal ingenieril en su etapa de construcción.

Figura 9. HCFSSV para tratar agua de producción, en etapa de construcción en Buffalo, Nueva York, USA.



Fuente. Wallace y Davis, 2009.

4.2.2.1 Elevación. El proceso de excavación de los HCFSSH es sencillamente el mismo que para los humedales de flujo superficial. Herramientas básicas como la ecuación 3, puede ser usada para estimar el volumen de tierra removido.

$$Ec. 3 \quad V_B = \frac{h_E}{6} [LW + (L - 2sh_E)(W - 2sh_E) - 4(L - sh_E)(W - sh_E)]$$

Donde:

- h_E = Profundidad escavada, m
- L = longitud del humedal en el punto, m
- W = Ancho del humedal en el punto, m

- s = Pendiente lateral, m/m
- V_B = Volumen escavado, m³

El objetivo básico es escavar un nivel (o piso), con una pendiente constante en fondo. La configuración de la elevación correcta de cada cuenca, tubería y estructura de control, es uno de los aspectos fundamentales y críticos del proceso de construcción¹⁰³.

La distancia y elevación de los diferentes componentes del proceso son medidas tomadas teniendo en cuenta un determinado punto de referencia. Usualmente estos tipos de mediciones son hechas con dos propósitos.

- Confirmar individualmente que cada componente del proceso tiene la elevación correcta.
- Confirmar que la remoción de tierra tiene el grado uniformidad especificada (tolerancia de menos de ± 5 cm).

4.2.2.2 Instalación de Membranas. Los dos materiales de membranas más usados comúnmente son: policloruro de vinilo (PVC) de 0.76 mm, y polietileno de alta densidad (HDPE) de 1.0 mm, el cual es usado para proyectos más grandes. La principal desventaja de la membrana PVC, es que el material necesita en campo, el uso de adhesivo o cinta, así que demanda que la mayoría de la membrana sea cosida en fábrica y se entregue en el sitio de trabajo. Esto lo limita al uso en humedales pequeños, es decir menores a 1000 m².

En proyectos más grandes, se requerirá costura en campo, puesto que las membranas se entregan en rollos. Una vez instalada la membrana, se evalúa el trabajo con un factor de costura.

¹⁰³ Ibid. , p. 758

4.2.2.3 Berma. En la construcción de la berma, solo se tiene el aspecto crítico de la instalación de la membrana, ya que la berma debe tener una forma eficaz y sencilla de anclar esta membrana.

Los bordes de los humedales de FSS a menudo son bermas de tierra y aunque su construcción es simple, aparentemente, en la interface berma/membrana es común cometer errores de construcción. El diseño y construcción de la berma cuenta con variedad de factores como:

- El ángulo de reposo de los suelos nativos en el lugar del proyecto.
- La zanja de anclaje para asegurar la membrana.
- Clasificación de los bordes exteriores de la berma para prevenir que aguas pluviales entren en la cuenca.
- El tratamiento de superficie de la cara interna de la berma.

Los diseñadores de los humedales a menudo asumen que la pendiente lateral puede ser construida, sin embargo, esto depende del ángulo de reposo que tenga el suelo. Así que en el diseño, se debe verificar si en realidad se puede construir el talud especificado en el sitio del proyecto. En la figura 5, se muestra un HCFSSH con bermas como borde.

4.2.2.4 Paredes laterales

Una alternativa diferente a las bermas de tierra es el uso de paredes laterales. Las paredes laterales requieren un material de construcción adicional y son un poco más costosos, pero ofrecen las ventajas de una mejor eficiencia en el espacio y una mayor facilidad en la instalación de la membrana¹⁰⁴. Las paredes laterales pueden ser construidas de madera terciada, bloque de concreto o concreto hecho en el sitio.

¹⁰⁴ Ibid., p. 760

La primera alternativa, el sistema de muro de madera, no es estructuralmente estable por sí misma, tanto en la parte exterior como interior hay soportes que la mantienen de pie.

En muchas partes del mundo el uso de bloques de concreto es muy común, ya que su material de construcción es más barato y aun ofrece ventajas frente a las bermas de tierra. Estos bloques son hechos de concreto y acero para reforzar su estructura. En la figura 10, se puede observar un ejemplo del método de construcción.

Figura 10. Planta piloto para depurar agua residual de una familia de 7 personas en zona rural de Santa Marta, Colombia



Fuente. Universidad del Atlántico

El tercer método de construcción, el concreto hecho en el sitio, es el método más costoso, pero ofrece una estructura más fuerte frente a los otros. Este sistema se utiliza a veces en humedales para biosólidos, ya que al descargarse la cuenca, los vehículos de remoción pueden hacer presión directamente contra la pared de concreto.

4.2.2.5 Instalación de estructuras de control. Para pequeños sistemas de HCFSSH, las estructuras de control son simples unidades de tuberías verticales o

diseños de apilamiento de placas. El principal desafío del diseño de la estructura de control es permitir al operador acceder al sistema de una forma fácil y segura. En la figura 11, se muestra una unidad de control de un HCFSSH en España.

Figura 11. Unidad de control de nivel de agua en un HCFSSH en Almatret Nord, Cataluña.



Fuente. Cortesía de Aracelly Caselles Osorio.

4.2.3 Plantación y puesta en marcha. Probablemente el aspecto más relevante en la puesta en marcha de un sistema HCFSSH es la selección de vegetación a implementar en el humedal. Durante el proceso de implementación se combina el proceso de selección de las plantas con el control del nivel de agua.

• **Selección de las plantas.** La selección de las plantas se ve limitada a la disponibilidad existente en los lugares aledaños de la zona de implementación del sistema. Sin embargo, también se buscan características tales como: (1) que posean un denso sistema rizomático, (2) que no sean invasivas y (3) que la

penetración de sus raíces sea suficiente para cubrir toda la profundidad del humedal. En Colombia, plantas nativas de la región Caribe, como la *Eriochloa aristata* o la *Eleocharis mutata*, han sido utilizadas en plantas piloto, mostrando una alta eficiencia en la reducción de contaminantes en climas tropicales¹⁰⁵. En la figura 12, se muestra un ejemplo de las especies nativas mencionadas.

Figura 12. *Eriochloa aristata* (izquierda) y *Eleocharis mutata* (derecha) en una planta piloto en la universidad del Atlántico, Barranquilla.



Fuente. Cortesía de Aracelly Caselles Osorio.

- **Adecuación de la vegetación al humedal.** El proceso de sembrado de las plantas en HCFSSH suele ser hecho a mano. Inicialmente se debe tener el humedal libre de agua para proceder a la plantación de la vegetación, permitiendo

¹⁰⁵ CASELLES-OSORIO, A. y VILLAFANE, P. 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.

la estabilización de las raíces. Sin embargo, una vez han sido plantadas, el humedal debe ser nuevamente llenado de agua para evitar el secado de las raíces, ya que por ser plantas macrófitas pueden morir si son dejadas por tiempos prolongados en un ambiente seco.

La vegetación requiere de un periodo de estabilización en el que las plantas se acoplan a las condiciones del nuevo ecosistema. Por lo tanto, en HCFSSH es recomendable iniciar el llenado del lecho con agua limpia y luego ir adicionando gradualmente el agua residual. También es idóneo realizar el proceso de esta manera para evitar que el personal humano encargado de la siembra no entre en contacto directo con aguas residuales, pudiendo generar problemas de salubridad.

5. CAMPO COLOMBIANO

Con el fin de aplicar el diseño de un HCFSSH, se procedió a recopilar la información del campo colombiano donde se propone implementar el humedal. Variables tales como la ubicación geográfica, altitud, y demás características físicas y climáticas del lugar, fueron necesarias para la posterior realización del diseño. Por otra parte, se escogieron dos contaminantes principales a tratar, debido a su influencia en el dimensionamiento del humedal: la carga orgánica de entrada al sistema, representada por la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), y los sólidos totales, haciendo especial énfasis en los Sólidos Suspendidos Totales (SST) debido a su potencial precipitación en el lecho.

Así mismo, se conto con información sobre los costos efectivos totales del sistema de tratamiento actual del campo, los cuales fueron insumos importantes para la estimación de los costos efectivos en comparación con el sistema propuesto.

5.1 INFORMACIÓN DEL CAMPO COLOMBIANO

El campo está ubicado en el departamento del Meta, como se muestra en la figura 13. El bloque en el que se encuentra tiene una extensión de 23.424 hectáreas y es operado por ECOPETROL S.A. Dentro de las facilidades del campo se encuentran tres (3) estaciones de recolección, con capacidad total de tratamiento de 1457.5 KBFPD¹⁰⁶ y de almacenamiento de 29 KBF¹⁰⁷, ubicadas a 4° de latitud norte. El campo se encuentra a una altitud promedio de 400 msnm¹⁰⁸, con temperatura promedio de 27°C y temperaturas máxima y mínima de 32°C y 17°C, respectivamente. La precipitación media anual de 3663 milímetros¹⁰⁹.

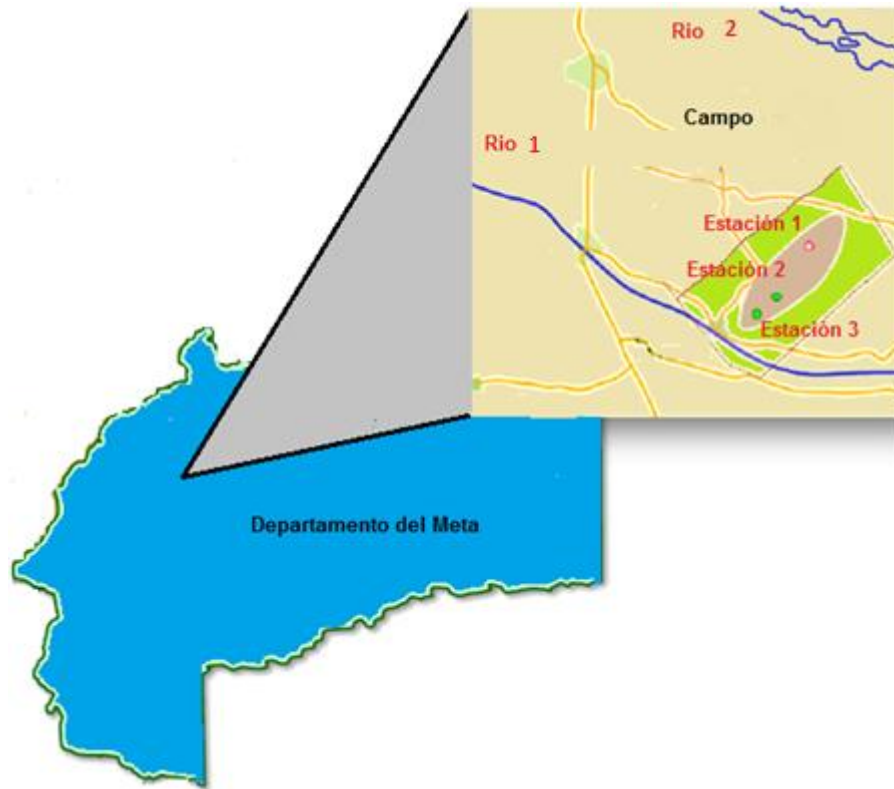
¹⁰⁶ KBFPD: Miles de barriles de fluido por día.

¹⁰⁷ KBF: Miles de barriles de fluido.

¹⁰⁸ ECOPETROL S.A.

¹⁰⁹ ColombiaTurismoWeb. En: <http://www.colombiaturismoweb.com/DEPARTAMENTOS/META/MUNICIPIOS/VILLAVICENCIO/VILLAVICENCIO.htm>

Figura 13. Ubicación geográfica del campo.

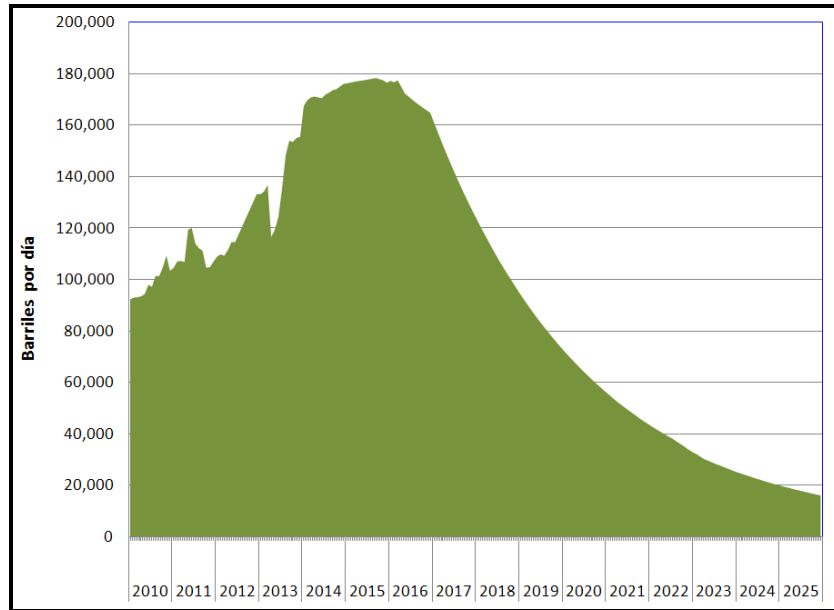


Fuente. Modificado de ECOPETROL S.A.

5.1.1 Petróleo. En el plan de desarrollo del campo, se plantea llegar a una producción promedio de 170 KBOPD para el año 2015, como se observa en la figura 14, la cual se sostendrá por los siguientes 5 años. El BSW del campo actualmente es de 83% y su relación agua-petróleo (RAP) es de 1:5, con pronósticos de relación 1:35 para 2018¹¹⁰ (ver figura 15).

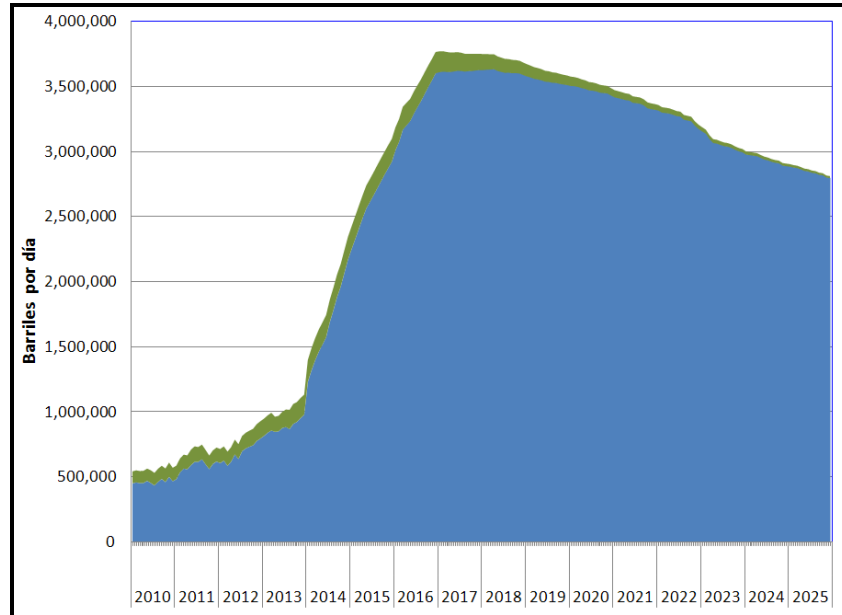
¹¹⁰ ECOPETROL S.A.

Figura 14. Pronóstico de producción de aceite según el plan de desarrollo propuesto.



Fuente. ECOPETROL S.A.

Figura 15. Relación agua-petróleo esperada en los próximos 15 años.



Fuente. ECOPETROL S.A.

Para el tratamiento del crudo del campo se utilizan cuatro (4) etapas posteriores a la salida del múltiple de recolección: surgencia, compensación, lavado y

almacenamiento; siendo las tres primeras etapas vitales para la deshidratación del crudo y posterior envío al Sistema de Tratamiento de Agua de Producción (STAP).

5.1.2 Agua de producción. El agua de producción es un fenómeno frecuente desde el inicio de la vida productiva del campo. Al tener un acuífero activo, el mantenimiento de la presión en el yacimiento permite la extracción de grandes volúmenes de crudo, pero también de grandes cantidades de agua.

El campo tiene una producción diaria promedio de 678.607 barriles de agua, según muestras tomadas en Marzo de 2013¹¹¹. Así mismo, se realizó una caracterización fisicoquímica del agua producida que llegaba al STAP de la estación 2, con el fin de analizar los valores de carga orgánica y sólidos totales del sistema. En la tabla 8 se muestran los valores obtenidos a la entrada y salida del STAP:

Tabla 8. Muestra de valores obtenidos de entrada y salida del Sistema de Tratamiento del Agua de Producción (STAP).

	Entrada al STAP	Salida del STAP
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), mgO₂/L	31	2,42
Sólidos Suspendidos Totales (SST) mg/L	44	<5
Sólidos Totales (ST) mg/L	580	297

Fuente. ECOPELROL S.A.

5.1.3 Sistema de tratamiento de agua producida (STAP). El sistema de tratamiento actual del campo, consta de seis (6) etapas:

- **Separadores CIP:** Es un separador que cuenta con placas corrugadas que ayudan en el cambio de dirección del fluido mientras que este se desplaza. A medida que el agua aceitosa fluye, las gotas que están finamente dispersas

¹¹¹ Ibid.

comienzan a separarse por una diferencia de densidades entre las placas y hacen coalescencia hasta tener el tamaño suficiente para separarse en diferentes fases, este sistema se denomina CIP (Interceptor de placa corrugada). En la figura 16 se pueden observar las unidades CIP que usadas en el campo.

Figura 16. Unidades CIP del campo, 80.000 BPD/CU



Fuente. ECOPELROL S.A.

- **Celdas de flotación:** Las Unidades de flotación emplean un proceso en el que las burbujas finas de gas se generan y se dispersan en el agua, donde se adhieren a las gotas de aceite y / o partículas sólidas. Las burbujas de gas después ascienden a la interface de vapor-líquido en forma de espuma aceitosa¹¹². En la figura 17 se muestran las celdas de flotación del campo.

¹¹² Arnold, Ken & Stewart, Maurice. Surface Production Operations. 3ed. Houston: Elsevier, 2008.

Figura 17. Celdas de flotación campo, 120.000 BPD/CU



Fuente. ECOPETROL S.A.

- **Filtros:** La unidad de filtración se encarga de separar gotas de diferentes densidades con un diámetro mucho más pequeño que las que son separadas en las unidades CIP, en términos simples causan una coalescencia mejorada. En la figura 18 se observan las unidades de filtración del campo.

Figura 18. Filtros del campo, 50.000 BPD/CU



Fuente. ECOPETROL S.A.

- **Piscinas de aspersión:** El agua es bombeada por un sistema de aspersión con el fin de reducir la temperatura de esta, para su futuro vertimiento. El sistema de aspersión está situado en el perímetro de una piscina que recoge el agua que sale de este sistema. En la figura 19 se puede observar el sistema de aspersión del campo.

Figura 19. Piscina de aspersión del campo.



Fuente. ECOPETROL S.A.

- **Piscinas de estabilización:** Permiten que el agua fluya muy lentamente, facilitando que las gotas de crudo que aún permanecen suspendidas puedan flotar fácilmente, además, permiten que los finos que lleva consigo el agua puedan precipitarse hacia el fondo de ella¹¹³. En las figuras 20 y 21 se puede observar el sistema en el campo colombiano y un esquema de este respectivamente.

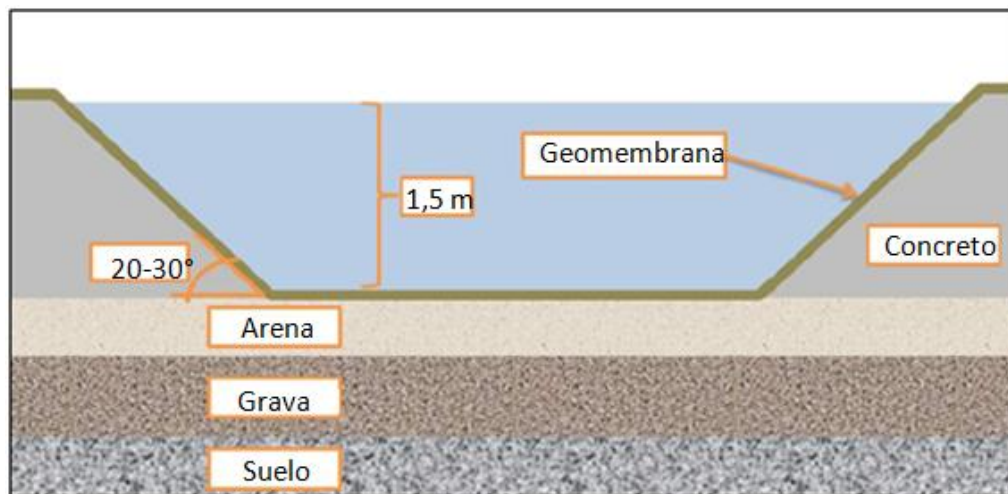
¹¹³ Ibid.

Figura 20. Piscina de estabilización, campo.



Fuente. ECOPETROL S.A.

Figura 21. Esquema de la piscina de estabilización del campo.



Fuente. ECOPETROL S.A.

- **Bombas de vertimiento:** Es un mecanismo que transforma energía mecánica en hidráulica, con el fin de aumentar la presión a un fluido, para así poderlo mover de un punto a otro.

En el campo, las bombas de vertimiento constan de tres partes, (1) el foso de aquietamiento, donde el agua que viene de las piscinas de estabilización entra en un estado de reposo, (2) el foso de vertimiento, en donde se encuentra ubicado el sistema de bombas que se observa en la figura 22 y (3) la línea de vertimiento, que se encarga de direccionar el flujo de agua hasta su lugar de vertimiento. El sistema de bombas se encarga de mantener el flujo de agua desde el foso de aquietamiento, pasando por el foso de vertimiento, hasta su posterior vertimiento por medio de la línea de vertimiento.

Figura 22. Bombas de vertimiento campo. 132.000 BLS/Prom. CU



Fuente. ECOPELROL S.A.

5.1.4 Cálculos económicos. Los costos de operación y mantenimiento del campo, varían dependiendo de las alternativas que se manejen respecto al uso que se le desee dar al agua. Cada alternativa supone tratamientos distintos, la inclusión de maquinaria, gastos mecánicos, eléctricos, civiles, de operación y

mantenimiento, que pueden variar de acuerdo al número de actividades realizadas.

Las alternativas manejadas son básicamente tres: (1) libre uso, (2) riego y vertimiento, que comprende el riego a cultivos agrícolas y pecuarios, o el vertimiento a cuerpos de agua superficiales y (3) disposición, en donde se busca inyectar agua en un pozo para disposición, en el acuífero y por debajo del contacto agua-aceite. Cada alternativa maneja diferentes tipos de tratamiento de acuerdo a la necesidad, teniéndose 4 estrategias para la primera alternativa, 4 para la segunda y 3 para la tercera, para un total de 11 estrategias.

Debido a que la normativa actual colombiana precisa valores máximos permisibles para vertimiento a cuerpos de agua superficiales¹¹⁴, pero no así para la inyección a pozos de disposición, y que la finalidad del funcionamiento de los HCFSSH y las otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales, no contemplan un posterior uso del agua para consumo humano, en el presente trabajo se analizarán los costos CAPEX (Costos de inversión inicial) y OPEX (Costos de operación y mantenimiento) propios del vertimiento a cuerpos de agua superficiales, y no se discutirán las otras dos alternativas manejadas por el campo.

Dentro de las opciones de vertimiento se manejan cuatro métodos distintos que contemplan formas de tratamiento que varían en la inclusión o no de tratamientos secundarios y terciarios, así como el uso de una u otra tecnología de común uso en la industria. El método actualmente manejado en el campo se muestra en la tabla 9:

¹¹⁴ Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. Decreto 3930 de 2010. [en línea].disponible en: <http://www.minambiente.gov.co>.

Tabla 9. Métodos de tratamiento en el campo.

Alternativa	Estrategia Utilizada		
	Primario	Secundario	Terciario
Riego/Vertimiento	CPI + Celdas de flotación + filtros	Torres de enfriamiento	Lagunas Aireadas

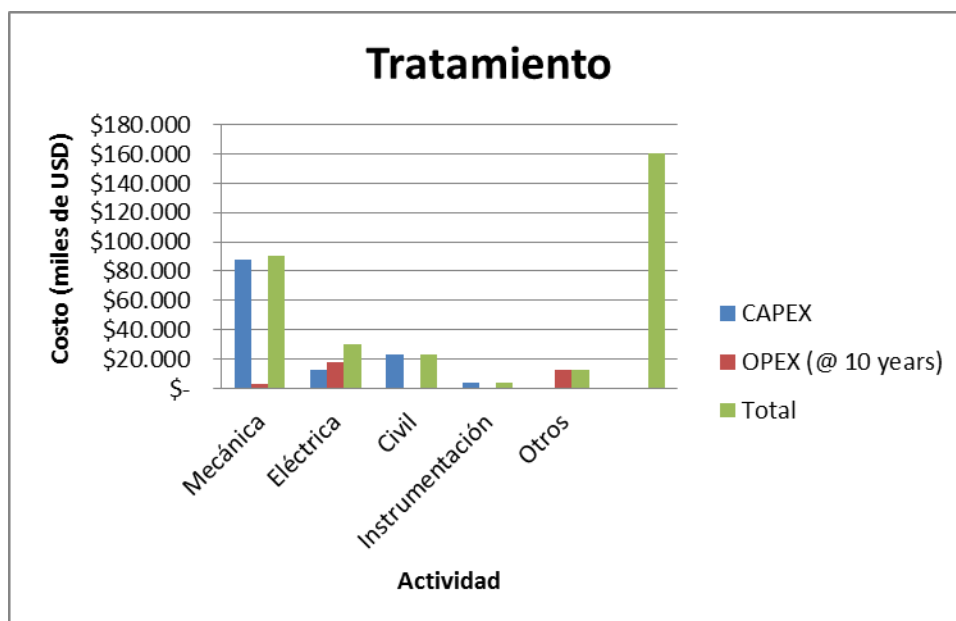
Fuente. Modificado de ECOPETROL S.A.

Los costos CAPEX y OPEX son evaluados de acuerdo al método actualmente utilizado. Es oportuno mencionar que los costos por inversión inicial (CAPEX) son analizados en la etapa de planeación del proyecto, mientras que los costos operacionales (OPEX) constituyen una evaluación futura de las necesidades de los equipos utilizados. Los ítems concernientes a costos de tratamiento son de acuerdo a necesidades, que pueden ser de tipo:

- **Mecánicas:** Comprende todas las necesidades de equipos y suministros, montajes, accesorios, mantenimiento e instrumentación requeridas por los métodos empleados en los tres tipos de tratamiento.
- **Eléctricas:** Abarca las necesidades energéticas de bombas, tableros, variadores, generadores y demás equipos que necesitan de suministro de corriente eléctrica.
- **Civiles:** Incluye todos los costos que corresponden al personal de obra civil involucrado en la puesta en marcha, mantenimiento, supervisión, movilización y administración del STAP en el campo. Es una actividad desarrollada únicamente en la puesta en marcha del proyecto, por lo que no es considerada un costo operacional.
- **Instrumentación:** La instrumentación está representada en todo proceso de control del funcionamiento del sistema. Al igual que en la actividad civil, no supone un costo operacional.
- **Otros:** Se refiere especialmente al uso de químicos para tratamiento, por lo que es un costo exclusivamente operacional.

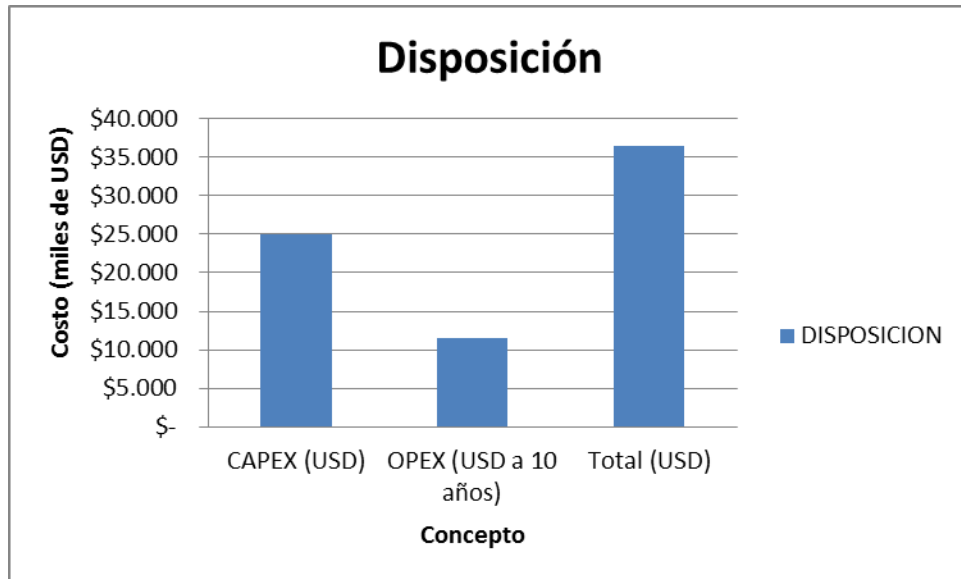
En la figura 23 se muestran los costos CAPEX y OPEX generados por el tratamiento del agua de producción del campo, gracias a la información suministrada por ECOPETROL S.A. Cabe mencionar que los costos OPEX están proyectados a 10 años de funcionamiento.

Figura 23. Costos generados por el tratamiento del agua de producción en el campo.



Sin embargo, la figura 23 no muestra los costos de disposición del agua. Estos deben ser sumados a los costos de tratamiento para mostrar un costo total. En la figura 24 se muestran los costos por concepto de disposición final (ECOPETROL S.A.):

Figura 24. Costos CAPEX-OPEX de disposición final.



En un marco general, la tabla 10 muestra los costos de tratamiento y disposición de manera más detallada, especificando los costos individuales de los tres tipos de tratamiento.

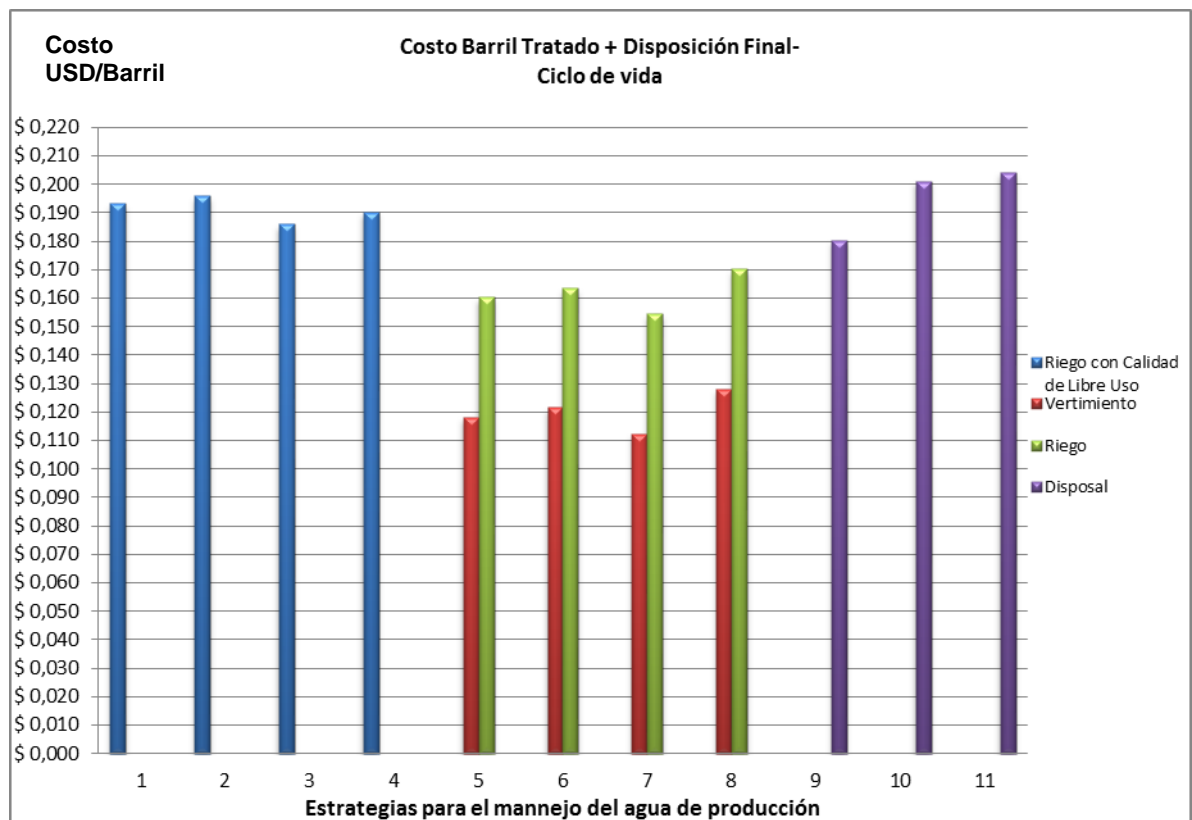
Tabla 10. Costo general del Sistema de Tratamiento del Agua de Producción del campo colombiano.

ACTIVIDAD	CAPEX (USD\$)	OPEX (USD\$)	TOTAL (USD\$)
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	36.491.374
COSTO TOTAL STAP			196.819.638

Sobre el total de costos de las figuras 23 y 24, se procede a analizar el costo total (tratamiento + disposición) por barril de agua para analizar el gasto diario que supone el agua de producción en el campo. La figura 25 muestra el consolidado del costo por barril de agua para cada una de las tres alternativas manejadas por ECOPETROL S.A., basados en un caudal medio de 480.000 barriles por día. Aquí

se evidencia que la alternativa de vertimiento a cuerpos de agua superficiales (columna en rojo – estrategia 7 en la figura 25) es la más económica para la empresa. Una vez realizado el diseño del HCFSSH se procederá a realizar los respectivos cálculos económicos, tomando como punto de comparación este valor, que se aproxima a US\$0,11/Barril.

Figura 25. Costo de tratamiento y disposición por barril de agua tratado



Fuente. Modificado de ECOPETROL S.A.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se describirá el diseño de un HCFSSH a escala real, aplicado al campo de petróleo colombiano descrito anteriormente. El campo colombiano fue seleccionado debido a su alta producción de agua, la cual conlleva a gastos de tratamiento y operación que serán descritos más adelante.

Por otra parte, en el diseño del humedal construido se aplicó toda la metodología especificada en los capítulos anteriores y se describieron los lineamientos para el manejo, operación y mantenimiento del sistema, así como los cálculos económicos necesarios para la implementación de la tecnología de humedales construidos.

6.1 DISEÑO DEL HCFSSH PROPUESTO PARA EL CAMPO COLOMBIANO

En el diseño del HCFSSH para el campo León, la variable más importante a calcular es el área superficial del humedal a escala real según los contaminantes seleccionados anteriormente, como son la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y los Sólidos Totales (ST), donde el área a utilizar será la que presente mayor valor en el cálculo realizado para cada contaminante. Esto último debido a que si se elige el contaminante con mayor área, implica que el humedal está en la capacidad de eliminar satisfactoriamente al otro.

El dimensionamiento del sistema, explicado en el capítulo 4, conlleva al análisis de una serie de variables que afectan al humedal y que en algunos casos resultan en prácticas recomendadas por Kadlec y Wallace (2009), quienes durante sus estudios, han logrado predecir comportamientos habituales del sistema bajo determinadas condiciones climáticas, físicas y biológicas. En la tabla 10, se

muestran los valores obtenidos para algunos parámetros que serán influyentes en el cálculo del área superficial del humedal, los cuales fueron determinados ya sea por los estudios hechos por Kadlec y Wallace (2009), o por análisis del agua a través de ECOPETROL S.A.

Tabla 11. Valores de los parámetros necesarios para el cálculo del Área del Humedal.

Parámetro	Valor	Fuente
Coeficiente de área de primer orden para DBO (K_{DBO}), m/d	0,625 (con 95%eficiencia)	Kadlec y Wallace, 2009.
Coeficiente de área de primer orden para SST (K_{SST}), m/d	_____	_____
Numero aparente de TIS (P)	3	Davis y Wallace, 2009.
Concentración de entrada para DBO (C_{iDBO}), mg/L	31	ECOPETROL S.A.
Concentración de entrada para SST (C_{iSST}), mg/L	44	ECOPETROL S.A.
Concentración de salida para DBO (C_{DBO}), mg/L	20	MADS
Concentración de salida para SST (C_{SST}), mg/L	25	MADS
Concentración de fondo para DBO (C^*_{DBO}), mg/L	5	Kadlec y Wallace, 2009.
Concentración de fondo para SST (C^*_{SST}), mg/L	_____	_____
Caudal de agua (Q), m ³ /d	107.890	ECOPETROL S.A.

Como se observa en la tabla 10, se tienen múltiples concentraciones y coeficientes de área dependiendo de cualquiera de los dos contaminantes analizados. Así mismo, la concentración de salida – C_{DBO} , C_{SST} – está ajustada 10 unidades por debajo de los límites máximos permisibles propuestos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, con el fin de asegurar la eliminación de contaminantes del sistema. Los límites máximos fueron especificados en la tabla 2. Además, se observa que los valores del coeficiente de área de primer orden y la concentración de fondo para los Sólidos Suspendidos Totales no tienen valor alguno. Esto porque en la información recopilada en la literatura no se encuentra un valor de 'k' propio para este contaminante, y por consiguiente tampoco lo hay para la concentración de fondo.

Como se mencionó en el capítulo 4, el coeficiente k es una variable experimental, por lo que para calcularse es necesario el estudio de plantas piloto. Los proyectos piloto estudiados en este documento presentaban valores de k para materia orgánica (DBO5), permitiendo analizar un comportamiento medio de la variable, el cual fue reflejado en la tabla 11.

No obstante, no existía información alguna para los Sólidos Suspendidos Totales; con base en lo anterior, el cálculo del área del humedal estará determinado por la concentración de materia orgánica que entra al sistema.

• **Calculo del área requerida:** Partiendo de la ecuación 1, descrita en el capítulo 4, y con el conocimiento de la ecuación 4, se puede generar una forma directa de determinar el área superficial del humedal, como se observa en la ecuación 5:

$$Ec. 4. \quad q = \frac{Q}{A}$$

Donde:

- q = Carga Hidráulica, (m/día).
- Q= Caudal de agua, (m³/día).
- A= Área superficial, (m²).

$$Ecu. 5. \quad A = \frac{\left[\left(\frac{C_i - C^*}{C - C^*}\right)^{\frac{1}{P}} - 1\right]PQ}{K}$$

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).

En la tabla 12, se observa el área superficial del humedal calculada para el parámetro en estudio, teniendo en cuenta los valores previamente representados en la tabla 11.

Tabla 12. Área requerida para el humedal de acuerdo con las concentraciones de entrada de DBO₅.

Área superficial del humedal respecto a la DBO₅ (A_{DBO}), m²	104.214
--	---------

Aplicando el coeficiente de confiabilidad (COR) mencionado en el capítulo 3, debemos adicionar un 15% del área calculada al área total del sistema, obteniendo un área superficial final de 120.000 m².

- **Implementación** La implementación del sistema se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en el capítulo 4. En gran parte de los parámetros especificados se presentan valores predeterminados de acuerdo a las prácticas realizadas por Kadlec y Wallace (2009). Sin embargo, características como la distribución de flujo, la configuración de las celdas o la evapotranspiración, fueron determinadas de acuerdo a variables o expresiones representativas del desempeño del humedal en el campo específico.

- **Configuración de las celdas y distribución de flujo.** La configuración de las celdas en el sistema se encuentra representada por la relación largo-ancho del humedal. Según Kadlec y Wallace (2009), en el diseño de HCFSSH se deben manejar relaciones cercanas a “1”, siempre con la tendencia a ser un humedal de geometría cuadrada. De acuerdo con lo anterior, se sugiere una distribución de flujo con relación largo-ancho de 0,75, lo que supone un ancho de humedal de 400 metros por 300 metros de largo.

De igual manera, se sugiere un humedal compuesto por 12 trayectorias de flujo en paralelo, en donde cada trayectoria estará conformada por 5 celdas en serie. Esto permite optimizar la distribución de flujo en el sistema mediante la división del caudal de entrada, y a su vez maximizar el tiempo de colmatación del humedal mediante la conservación de relaciones largo-ancho cercanas a 1. En cuanto a la distribución del flujo, se plantea la inclusión de cámaras de infiltración como mejor método de llenado del lecho, facilitando el flujo del afluente a todas las celdas presentes en el humedal.

- **Evapotranspiración.** El cálculo de la evapotranspiración potencial diaria se realiza mediante la ecuación simplificada de Hargreaves, mostrada en la ecuación 6:

$$Ec. 6. \quad ET_0 = 0,0023(t_{mesd} + 17,78)R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0,5}$$

Donde:

ET_0 = Evapotranspiración potencial diaria, mm/día

T_{med} = Temperatura media diaria, °C

T_{max} = Temperatura diaria máxima, °C

T_{min} = Temperatura diaria mínima, °C

R_0 = Radiación solar extraterrestre, mm/día

De acuerdo con la información del campo seleccionado, la evapotranspiración media es de 5.85 mm/día.

En la tabla 13 se ve representada la selección de ciertos parámetros de implementación, de una forma recomendada como se describe en el capítulo 4.

Tabla 13. Parámetros de diseño recomendados para un sistema de HCFSSH en el campo colombiano.

Parámetro	Selección
Acceso	6 m de separación en el perímetro del humedal.
Pendiente	2% de pendiente, teniendo en cuenta el talud natural del terreno.
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
Distribución y mantenimiento de flujo	Cámaras de infiltración a la entrada y salida
Numero de celdas	60
Profundidad de la celda	60 cm
Tipo, tamaño del medio granular	Grava fina de 10 mm para la zona media, grava de 35 mm para las zonas de 1 m de longitud de entrada y salida.
Membrana	40-mil (1.0 mm) HDPE
Berma/Paredes laterales	A selección del operador por evaluación de costos, pero se recomienda el uso de berma para la utilización del suelo

	escavado.
Selección de plantas	<i>Eriochloa Aristata</i> – <i>Eleocharis Mutata</i> – <i>Cyperus Articulatus</i>
Instalación de estructuras de control	A la salida del sistema, con compuertas de control.
Conductividad hidráulica	13.500 m/d

Una vez calculados y establecidos los parámetros de implementación del sistema, se realiza un reporte formal del diseño sugerido para el tratamiento secundario y terciario del agua de producción del campo León. La tabla 14 muestra el resumen de los aspectos más relevantes en la implementación del diseño al campo.

Tabla 14. Resumen detallado de los parámetros de diseño de un HCFSSH para el campo colombiano.

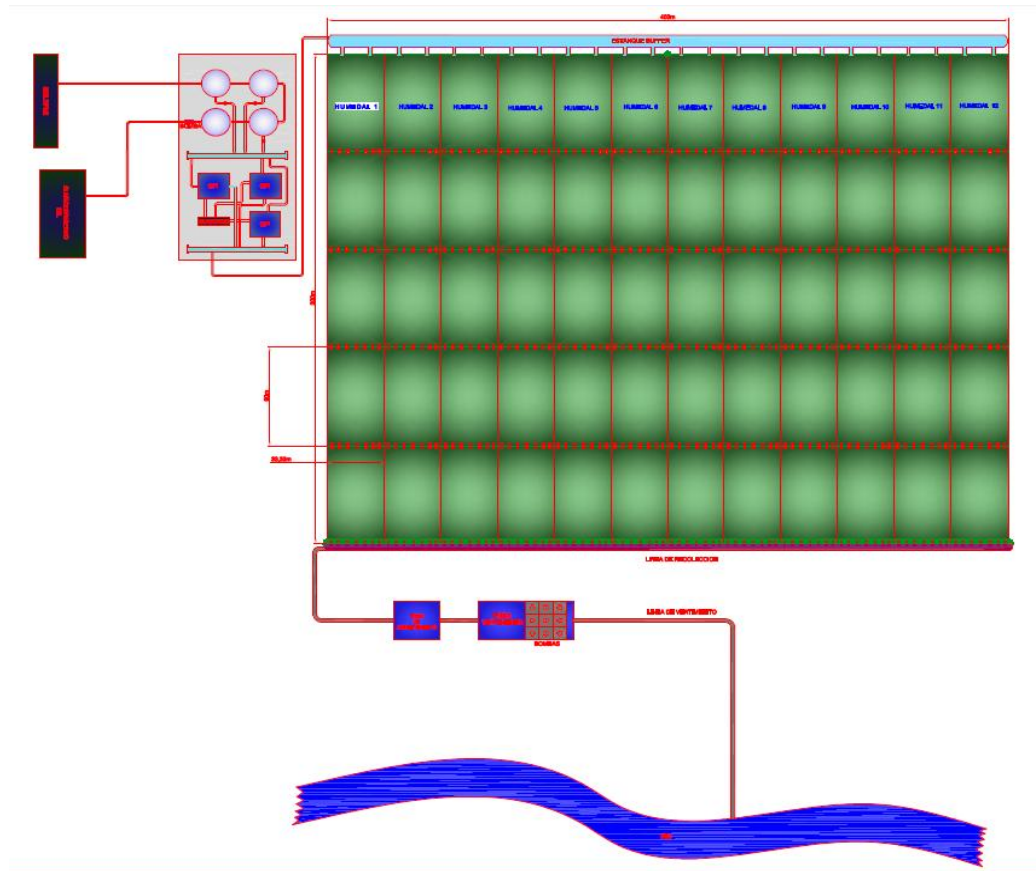
Parámetros de entrada		Valores calculados			
Caudal, Q	107.890 m ³ /día	Volumen por Tanque	24.000 m ³		
Precipitación, P	10 mm/día	Área por Tanque	40.000 m ²		
Evapotranspiración, ET	5,85 mm/día	Flujo afluente, Q _i	107.890 m ³		
Infiltración	0 (se usa membrana)	Flujo efluente, Q _o	108.388 m ³		
PTIS	3	Flujo promedio, Q _{prom}	108.139 m ³		
Área, A	120.000 m ²	Carga orgánica en el humedal	0,01 g/m ² día por trayectoria		
Porosidad, ε	40 %	Carga hidráulica basada en Q _{prom}	0,901 m/día		
Profundidad del lecho	0,6 m	Tiempo de retención hidráulico nominal	17 horas		
C _i	31 mg/L	Tiempo de retención hidráulico con Q _{prom}	16 horas		
C*	5 mg/L	Membrana requerida	110% del área total del humedal		
K	0,625 m/día				
C por regulación	20 mg/L				
Valores calculados según P (TIS).	Entrada al sistema	Salida del humedal 1	Salida del humedal 2	Salida del humedal 3	Salida del sistema
Flujo neto, m ³ /d	107890	108056	108222	108388	108388
Volumen de	1200	400	400	400	—

Precipitación, m ³ /d					
Volumen de Evapotranspiración, ET, m ³ /d	702	234	234	234	—
Infiltración, m ³ /d	0	0	0	0	—
HLR, q, m/d	0,9	2,7	2,705	2,71	0,903
Nominal HRT, días	0,7	0,22	0,22	0,22	0,68

Cabe mencionar que los valores calculados, mostrados en la parte inferior de la tabla 14, corresponden a volúmenes diarios de agua con base al caudal de entrada, precipitación y evapotranspiración, basados en el número aparente de tanques, el cual tiene un valor de 3.

Para ilustrar de una mejor manera la organización del sistema, la figura 26 muestra un esquema del humedal construido, proponiéndolo como tratamiento secundario y terciario del agua de producción. El afluente proviene del tratamiento primario del campo, mientras que el efluente es recogido por las cámaras de infiltración para luego ser llevado mediante líneas de flujo hacia el foso donde se encuentran las bombas de vertimiento al río. En el anexo 2 se muestra con mayor detalle una descripción de la línea de procesos y componentes generales de la figura 26.

Figura 26. Esquema del HCFSSH propuesto para el campo colombiano.



6.2 MANEJO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Una vez realizado el diseño del sistema se inicia su puesta en marcha. Al igual que en cualquier tipo de proyecto, la construcción del humedal está constituida por un contrato entre la operadora y quien provee los servicios, en donde debe haber buena comunicación para que se logren los objetivos trazados y para que el operador se vaya familiarizando con la tecnología de humedales construidos. Las operaciones de manejo, operación y mantenimiento se dividen en cinco (5) fases:

- **Etapas tempranas** En los inicios del sistema lo más importante es la adecuación de la vegetación, como se mencionó en el capítulo anterior. En consecuencia, la puesta en marcha del humedal supone un periodo de adaptación

no menor a dos años para que las plantas desarrollen sus raíces, se adapten al medio donde habitarán y toleren la fuente de contaminantes procedentes del agua de producción. Este mayor tiempo de aclimatación infiere cierta desventaja en la implementación de la tecnología, sin embargo, una vez alcanzada esta etapa, la ventaja de las altas eficiencias a un tiempo relativamente largo, compensa el tiempo de adaptación de la vegetación.

La adaptación de las plantas al medio requiere de especial cuidado, previo a la siembra en el lecho del humedal. Inicialmente deben ser cultivadas por aparte, alimentándolas con agua de producción en contenedores separados del humedal. Mientras tanto, el humedal empieza a ser saturado con el agua residual sin tener vegetación alguna. Una vez las macrófitas han acoplado el medio a su reproducción, se realiza el cultivo en el área diseñada previamente. Una vez las raíces han crecido en los tamaños esperados (30-60 cm), se dará inicio a la circulación continua de agua en el sistema.

- **Monitoreo** El monitoreo es la mejor forma de determinar la operatividad del sistema. En HCFSSH, se suelen realizar muestreos en la entrada y salida del humedal, con el fin de buscar y analizar un comportamiento respecto a la eliminación de contaminantes. Por desgracia, es muy complicado realizar muestreos en la zona media del sistema porque las muestras que se obtengan no representaran el comportamiento global de la trayectoria de flujo. Bombas peristálticas de desplazamiento positivo suelen ser usadas en los Estados Unidos para el muestreo en humedales de flujo horizontal¹¹⁵.

Los parámetros más importantes a monitorear son el flujo de agua, la concentración de contaminante y la vegetación del humedal. En lo que respecta al flujo de agua, se deben usar estructuras de medición en la entrada y salida del sistema, con el fin de controlar los caudales que se presentan en el lecho y las

¹¹⁵ Kadlec y Wallace. Op.cit

posibles pérdidas o ganancias de fluido por evapotranspiración o precipitación, respectivamente. Para el caso del campo León, las unidades de bombeo de las facilidades existentes son una herramienta válida para las mediciones del flujo de agua, que deben ser tomados diariamente en los extremos, así como los datos de temperatura diaria.

El control de las concentraciones de contaminantes es útil para corroborar las eficiencias de eliminación propuestas en las etapas previas. El análisis debe ser realizado mensualmente en laboratorio, tanto para la entrada como para la salida del sistema. Por último, la vegetación debe ser cuidada y monitoreada con regularidad ya que es la base del funcionamiento del sistema; las formas más comunes de manejo de las plantas es mediante la cuantificación de las zonas ocupadas por la planta y el tamaño de la misma. Cuantificar las zonas ocupadas es un trabajo que puede ser realizado a pie, observando que porcentaje del área total del sistema está siendo ocupado por la vegetación. Esto permite tener una idea de qué tan buena fue la adaptación de las plantas en cada una de las celdas. Así mismo, la altura de las plantas puede ser un indicio de su desarrollo. Registros fotográficos suelen ser usados para monitorear este parámetro.

- **Nivel del agua y mantenimiento del flujo.** El control del nivel del agua para HCFSSH debe ubicarse en la salida del humedal, y debe encontrarse bajo continua observación debido a la necesidad de las plantas macrófitas de alimentarse del fluido, por lo que éstas morirán si el nivel de agua en el lecho no supera la altura de las raíces de las plantas y será necesario replantar el sistema, perdiendo cantidades significantes de dinero. Una unidad de control como la mostrada anteriormente en la figura 11, es aplicable para realizar este tipo de control.

Por otro lado, el mantenimiento del flujo es una variable de especial cuidado en el sistema. Como se manejarán múltiples trayectorias de flujo, existe la posibilidad de sobrecargar con fluido unas más que otras, reduciendo considerablemente la

eficiencia global de eliminación del sistema. Por esta razón, es vital asegurar una equitativa distribución del caudal en las 12 trayectorias de flujo, con el fin de evitar problemas de inundación y colmatación de algunas celdas del sistema.

Las plantas juegan otro papel importante en el mantenimiento del flujo. Como se mencionó en el control de nivel del agua, en HCFSSH se debe mantener el flujo de agua únicamente por el lecho granular, dejando una zona libre de saturación. Esta zona permite la adaptación de plantas como la *Eriochloa Aristata* o la *Eleocharis Mutata*, que se han desempeñado de forma satisfactoria en climas tropicales y fueron mostradas en la figura 12 (Caselles-Osorio et al., 2011).

• **Mantenimiento de la vegetación** Existen dos percepciones sobre la vegetación que deben ser analizadas si se desea llevar una operación exitosa de las plantas: (1) el humedal trabaja bien si toda su área de influencia es verde y (2) las plantas cultivadas originalmente en el humedal son las únicas que deben estar en el mismo. La primera percepción hace referencia a algo que para algunos expertos es “estético”¹¹⁶, puesto que el hecho de encontrar zonas sin coloración verde – vegetación – no implica que no se esté realizando la eliminación de contaminantes. El lecho y el medio granular son también una fuente de eliminación de contaminantes a pesar de que, al ser los HCFSSH un sistema biológico, evidentemente la presencia de plantas es la que gobernará el área diseñada.

La segunda percepción hace referencia al tipo de planta cultivada en el sistema. En algunos sistemas utilizados en Norteamérica se ha promovido la utilización de humedales construidos para el cultivo de productos agrícolas, como se observa en la figura 27. Sin embargo, es normal encontrar áreas con presencia de maleza o hierba mala, la cual debe ser removida del humedal para mantener el correcto funcionamiento del sistema, no solo para cultivos agrícolas, sino también para macrófitas acuáticas, como es el común uso. En HCFSSH se utiliza la poda y

¹¹⁶ Ibid.

posterior quema de maleza de forma periódica para el mantenimiento de la vegetación.

Figura 27. Cultivo de maíz implementado en un HCFSSV en zona rural de Middlebury, Indiana. 2011



Fuente. Sergio Díaz Caselles.

• **Problemas a largo plazo.** Como consecuencia normal del funcionamiento de humedales construidos se encuentra la acumulación de sólidos y sedimentos en el lecho. La deposición de material granular, detritus vegetal y biofilm pueden ser factores de colmatación del sistema y posterior inundación. El diseño de HCFSSH con bajas cantidades de materia orgánica puede reducir o retardar los efectos de colmatación o inundación, pero no hay evidencia alguna de que se pueda evitar la colmatación en la zona de entrada al sistema¹¹⁷. Basados en el rendimiento de HCFSSH preexistentes, se sugiere un mantenimiento en la zona de entrada al

¹¹⁷ Ibid.

sistema cada 3 años, con el fin de evitar largas áreas de circulación de agua por la superficie del humedal.

Respecto a la colmatación del lecho granular, actualmente no existen métodos de prevención consolidados. Sin embargo, en caso de presentarse un problema de este tipo es necesario remover el material granular del sistema y cambiarlo por uno nuevo, o bien realizar un lavado y reinsertarlo al humedal. En la figura 28 se muestra un ejemplo de un humedal colmatado y la extracción del material granular por efecto de la que sufrió colmatación del lecho granular.

Figura 28. A, lecho granular colmatado; B, extracción de un lecho colmatado. Aliceville, USA.



Fuente. Cortesía Leslie Behrends (TVA, Alabama).

6.3 CÁLCULOS ECONÓMICOS

Los costos del sistema HCFSSH se dividen, al igual que un tratamiento convencional, en dos grandes grupos: los costos por inversión inicial (CAPEX) y los de operación y mantenimiento (OPEX) de la tecnología. La mayoría de los humedales construidos de flujo sub-superficial en operación hasta el momento comprenden áreas pequeñas, con tratamientos secundarios y terciarios a caudales reducidos¹¹⁸, dado que su aplicación ha sido para pequeñas poblaciones y áreas rurales. No obstante, existen buenos ejemplos en la industria petrolera

¹¹⁸ Ibid.

donde se han construido grandes sistemas de humedales de flujo superficial con áreas superiores a las 200 hectáreas, como en el desierto de Omán, donde inicialmente se tratan 45.000 m³ de agua de producción diaria, esperando cubrir el total de 210.000 m³ producidos diarios¹¹⁹. En este sentido, en el presente trabajo se realizó una propuesta de un HCFSSH para manejar caudales superiores a los 100.000 m³/día.

Haciendo una comparación entre los costos CAPEX del sistema HCFSSH con los de los tratamientos convencionales manejados en el campo, se encuentra que no son muy distantes. Sin embargo, los costos OPEX son normalmente mucho menores, comparativamente, con otras tecnologías. El uso de herramientas mecánicas es generalmente más costoso de operar debido a sus requerimientos energéticos y de mantenimiento. En HCFSSH la demanda energética, de operación y mantenimiento del sistema es casi nula, pero la demanda de área es mucho mayor. Para defectos prácticos, todos los costos expresados en este estudio corresponden a dólares americanos que datan del año 2006, pero modificados al 31 de diciembre de 2012 mediante la calculadora de inflación de la oficina del departamento de trabajo de los Estados Unidos¹²⁰.

6.3.1 CAPEX. Los costos de capital en HCSFSSH se encuentran ligados a la disponibilidad de equipos y materiales en el sector de implementación de la tecnología. Los materiales y equipos suelen ser encontrados fácilmente en cualquier ciudad capital del territorio colombiano, pero debido a que existen trabajos pertinentes a la tecnología de humedales construidos, los cuales no son comúnmente aplicados por la industria colombiana, se manejaron costos de capital generales de la industria estadounidense. Por ello cabe mencionar que los costos de algunos materiales de construcción son más económicos en Colombia,

¹¹⁹ Breuer R.S. , Schlicht T. , Bauer Nimr. 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. 2011. En: Onepetro.org [base de datos en línea].

¹²⁰ Bureau of Labor Statistics.[En línea]. Disponible en: http://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm

reduciendo notablemente la inversión inicial. Los principales materiales con su respectivo costo medio a evaluar, según Kadlec y Wallace (2009), se muestran a continuación:

- **Terrenos.** La adquisición de terrenos es uno de los costos iniciales en la implementación de HCFSSH. Sin embargo, como la extensión del campo colombiano es suficiente para la realización del proyecto, los terrenos no suponen un costo adicional en la instalación del sistema.
- **Diseño y estudio de suelos.** Como se mencionó en el capítulo 3, el conocimiento del lugar de implementación del sistema es un aspecto fundamental para el inicio del proyecto. Se necesita realizar estudios topográficos y geológicos del lugar con el fin de establecer la mejor zona de adecuación de la tecnología. Desafortunadamente, en Colombia no se conoce aún un humedal construido implementado a la industria petrolera, por tanto, se usaran los costos promedio para estudios topográficos colombianos, los cuales varían entre 57 – 570 US\$ por hectárea¹²¹.

Por su parte, los estudios geológicos se realizan mediante investigaciones geotécnicas, donde se busca uniformidad del suelo, y como investigaciones hidrogeológicas, donde se analizan las posibles filtraciones de agua de formaciones someras en el humedal. Los costos en estos estudios se estiman en 851 US\$ por hectárea.

- **Excavaciones.** Los costos por excavación se resumen en dos grandes grupos: costos por remoción de tierra, los cuales son dados por metro cúbico de tierra; y los costos de movilización de la tierra removida, que se dan en metro cúbico de tierra por m². Para HCFSSH, el costo medio por remoción de tierra es de US\$ 8,61/m³ y el de movilización de tierra removida es de US\$ 5,76/m² (122).

¹²¹ Kadlec y Wallace. Op.cit

¹²² Ibid.

- **Membranas** Como se hablo en la fase de implementación, las membranas utilizadas para la impermeabilización del medio suelen ser de polietileno de alta densidad (HDPE) o con PVC. Respecto a esta área específica, los costos de instalación incluyen tanto el material a utilizar como las pruebas de calidad del material. En HCFSSH los costos medios de instalación de HDPE que se utilizará en el campo son de US\$ 9,86/m² ⁽¹²³⁾.
- **Medio granular (grava).** La grava es un material fácil de localizar en cualquier parte del país. Es por esto que los costos volumétricos de este material pueden variar y diferir significativamente de las tarifas norteamericanas. La grava utilizada es de dos tipos: la grava de la zona media del humedal y la de las zonas de entrada y salida del sistema. En la zona media se tiene material granular fino, con costos medios estimados en US\$ 47.68/m³, mientras que en los extremos se usan materiales con mayor diámetro, que tienen un costo medio de US\$ 54.20/m³ ⁽¹²⁴⁾, con transporte incluido.
- **Plantas.** La adquisición de la vegetación para instalar en el sistema es un proceso que varía según la forma de recolección de las plantas. En Colombia, estudios en plantas piloto del Caribe han utilizado plantas recogidas naturalmente de las numerosas zonas húmedas presentes en el departamento del Atlántico ¹²⁵. Así, pues, los costos de capital por adquisición de plantas se convierten en un proceso de recolección libre de cargo en los humedales naturales que posee el país. Para la instalación de vegetación en un sistema de gran tamaño como el propuesto para el campo, estudios recientes han mostrado un buen desarrollo de la especie *Cyperus Articulatus* para reproducción en el medio granular, y con

¹²³ Ibid.

¹²⁴ Ibid.

¹²⁵ Caselles-Osorio et al., 2011.

buena producción de biomasa¹²⁶. De acuerdo a lo anterior se recomienda el uso de esta especie, o bien el uso combinado de las tres especies sugeridas en la tabla 13. No obstante, si por decisión del constructor o responsable del proyecto, debe sembrarse cualquier otro tipo de macrófita acuática de las típicamente plantadas en HCFSSH, se requerirá asegurar la fuente de recolección y suministro de las mismas.

En general, los costos en la vegetación radican en el proceso de recolección y siembra, que se llevan a cabo por parte de mano de obra no calificada. La plantación en el humedal se realiza con espaciamientos de 35 centímetros entre cada planta, dando lugar a una capacidad aproximada de 3 plantas por cada metro de humedal. Según lo anterior, para el área propuesta en el campo serán necesarias 1.080.000 ejemplares distribuidas en las tres especies propuestas, a razón de 90.000 plantas por hectárea.

Según Kadlec y Wallace (2009), usando cifras pesimistas, una persona siembra 50 plantas por hora por día. Si se trabajan 8 horas diarias, la recolección será de 400 plantas por día, lo que supone una inversión de tiempo de 225 días de trabajo por hectárea. En Colombia, la mano de obra no calificada tiene un costo que oscila entre 20-25 US\$/día según el acuerdo que se haga entre trabajador y empleador, lo que supone un costo de instalación de vegetación de 5.625 US\$/hectárea.

- **Estructuras de control.** Las estructuras de control utilizadas en HCFSSH son básicamente de dos tipos: para distribución de flujo y para control del nivel del agua. Para distribución del flujo, tal como se describió en la tabla 13, se usaran cámaras de infiltración a lo ancho del humedal con el fin de distribuir de forma equitativa los caudales de entrada al sistema. De igual manera, a la salida del humedal se instalará otra cámara para recolección y distribución del efluente al

¹²⁶ Vega, H. Eliminación de materia orgánica y nitrógeno del agua residual doméstica en humedales construidos experimentales plantados con *Cyperus articulatus*. Trabajo de grado Biólogo. Barranquilla-Colombia: Universidad del Atlántico. Facultad de Ciencias Básicas. 2013.

foso de vertimiento. Los costos medios de cámaras de infiltración en los Estados Unidos son de US\$ 45,55/m ⁽¹²⁷⁾.

Por su parte, las estructuras del control de nivel del agua están hechas en concreto con dispositivos tipo presa que sirvan como alivio ante incrementos del nivel de agua en lecho. Los costos de construcción varían de acuerdo al tamaño de la estructura y a las necesidades del operador, por lo que no pueden ser evaluados directamente.

- **Costos independientes de la construcción.** Comprende costos de movilización, equipos de seguridad industrial, seguros, etc. Según Kadlec y Wallace (2009), estos costos suelen tener un valor medio del 4% del costo total del proyecto¹²⁸.

- **Observación y servicios en la puesta en marcha.** Constituye toda actividad de observación, supervisión, pruebas, asistencia y entrenamiento al personal encargado de la operación y mantenimiento de la puesta en marcha, así como los servicios de personal especializado en humedales construidos. Tiene un costo medio del 10% del costo total del proyecto¹²⁹.

La tabla 15 muestra un resumen de los costos de capital requeridos para la implementación de un HCFSSH en el campo.

Tabla 15. Costo total estimado CAPEX para el campo colombiano.

Parámetro	Costo, US\$
Estudios de suelo	17.052
Excavaciones	1.310.686
Membranas	1.183.200
Medio granular	3.433.686,6
Instalación de vegetación	67.500
Estructuras de control	36.440

¹²⁷ Kadlec y Wallace. Op.cit.

¹²⁸ Ibid.

¹²⁹ Ibid.

Costos independientes de la construcción	241.943
Observación y servicios en la puesta en marcha	604.856
COSTO TOTAL CAPEX	6.895.363,6

6.3.2 OPEX. Los costos operacionales en humedales construidos tienen costos intrínsecos de operación y mantenimiento muy bajos, en donde entran únicamente la energía para las bombas de suministro y vertimiento, monitoreo, mantenimiento de los accesos y las bermas y reparación ocasional de componentes mecánicos.

La mayoría de las tareas de operación y mantenimiento de humedales construidos se encuentran ligadas con el funcionamiento de las bombas. Para la estimación de los costos se tomará el mismo tiempo de operación del sistema actual (10 años), así como la misma tasa de interés propuesta por ECOPEPETROL S.A, la cual es del 11.1%.

Hablando de resultados anuales, los costos operacionales del humedal están estimados en US\$ 3.000/hectárea-año¹³⁰, para un total de US\$ 36.000/año. De otra parte, si durante el funcionamiento del humedal (más o menos durante los primeros 3 años) las zonas de entrada, muestran indicios de colmatación, los costos de mantenimiento estimados en la zona de entrada al humedal representarían un costo aproximado de US\$ 4.212/año¹³¹.

- **Cálculo del valor presente.** El cálculo del valor presente se realiza para determinar cuánto dinero deberá invertirse en el momento de la implementación del sistema para garantizar el cubrimiento de la operación y mantenimiento durante los diez años próximos, con una tasa de descuento del 11.1%. La ecuación 7 expresa el valor presente para operación y mantenimiento en 10 años:

¹³⁰ Ibid.

¹³¹ Ibid.

$$Ec. 7. \quad VP = Y * \frac{(1 + i)^N - 1}{i * (1 + i)^N}$$

Dónde:

VP = Valor presente, US\$

Y = Costo anual de operación y mantenimiento, US\$

N = Años de duración.

i = Tasa de descuento, fracción.

Aplicando la ecuación 7 obtenemos los costos operacionales a 10 años para el HCFSSH propuesto para el campo León:

$$VP = 40.212 * \frac{(1 + 0,11)^{10} - 1}{0,11 * (1 + 0,11)^{10}} = \text{US\$236.817,79}$$

Si bien el valor presente calculado corresponde a 10 años de vida útil, usado como punto comparativo con el sistema de tratamiento actual en el campo, el tiempo de vida útil de un humedal puede ser cinco veces mayor a este valor¹³².

6.4 APRECIACIONES GENERALES

En el desarrollo de este documento se tuvieron en cuenta tres aspectos importantes para cumplir con los objetivos propuestos; (1) comprender todo lo concerniente al agua de producción, como paso esencial para identificar las múltiples tecnologías que existen para su tratamiento, (2) determinar las diferentes tecnologías de tratamiento no convencionales o alternativas, como los sistemas de humedales construidos, para encontrar opciones amigables con el medio ambiente manteniendo la eficiencia de tratamiento y (3) establecer, paso a paso, los criterios de diseño de un sistema de tratamiento natural como los HCFSSH que permitan proponer un proyecto ingenieril que realmente mitigue el impacto ambiental del tratamiento del agua de producción en la industria petrolera. A continuación se

¹³² Ibid.

describen algunas temáticas abordadas en este documento, desde un punto de vista comparativo con las especificaciones actuales del campo colombiano, ejemplo de altos volúmenes de producción de agua en la industria petrolera colombiana.

En la elaboración del diseño de un HCFSSH como tratamiento del agua de producción para el campo, se determinaron los parámetros como: área requerida, profundidad y forma, entre otras variables para la zona de influencia del humedal.

Si bien los requerimientos de área del sistema son considerables y las eficiencias de eliminación de contaminantes del sistema actual superan el 97% para sólidos suspendidos, y el 99% para grasas y aceites¹³³, la implementación de un humedal construido en la zona es una alternativa viable para este campo y es comparable con otros humedales del mundo¹³⁴. De acuerdo con la información reportada por Kadlec y Wallace (2009), los resultados de diseño e implementación de un HCFSSH en el campo, satisfacen los requerimientos de tratamiento secundario y terciario del agua de producción de este, al igual que el STAP actual. Por consiguiente, el operador del campo podría tomar la decisión de cambiar el sistema secundario y terciario actual, para implementar un HCFSSH.

Debido a que los resultados del tamaño del humedal propuesto, corresponden principalmente al caudal de agua (>100.000 m³/día) que debe tratar por día, el área requerida para el campo correspondió a 12 hectáreas. Este tamaño es comparable con otros diseños de humedales construidos que funcionan actualmente en Dakota del Norte y California (Estados Unidos¹³⁵) y en Beijing (China¹³⁶), donde grandes áreas de humedales depuran el agua de producción de la industria petrolera. Si se revisa el humedal construido que opera en el desierto de Omán, donde se tratan 200.000 m³/día de agua de producción, se encuentra

¹³³ ECOPETROL S.A.

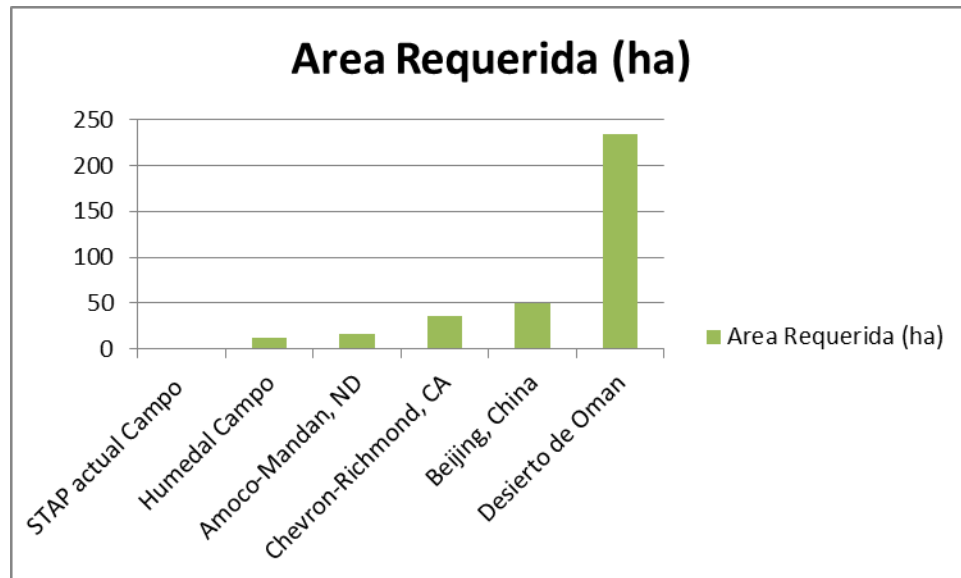
¹³⁴ Breuer y Schlicht, Op. cit.

¹³⁵ Kadlec y Knight, Op. cit.

¹³⁶ Ibid.

que tiene un área de 234 hectáreas¹³⁷, por lo que el valor de 12 hectáreas calculada para el campo resulta ser mucho menor (figura 29).

Figura 29. Áreas requeridas para el diseño de diferentes humedales construidos en el mundo comparadas con la requerida para el campo colombiano.



No obstante, estas grandes diferencias están relacionadas con la tipología del humedal. Los diseños de humedales mostrados en la figura 29 corresponden a humedales de flujo superficial, a diferencia del campo, que es de flujo sub-superficial. Actualmente en la industria petrolera no se tienen HCFSSH de grandes tamaños debido a los problemas de colmatación que pueden presentar; Sin embargo, el rango de área propuesto para HCFSSH está entre 0 y 20 hectáreas¹³⁸, rango en el que el diseño de campo es aplicable.

De otra parte, aunque el área de los terrenos utilizados para humedales como sistema de tratamiento, no suponga un activo en el análisis financiero, posterior a la terminación del tiempo de vida útil del proyecto, el ambiente natural mejora notablemente, ya que a lo largo de la vida de las plantas se genera un alto grado de biomasa, la cual es compatible con la flora y fauna del ecosistema, propiciando

¹³⁷ Breuer y Schlicht, Op. cit.

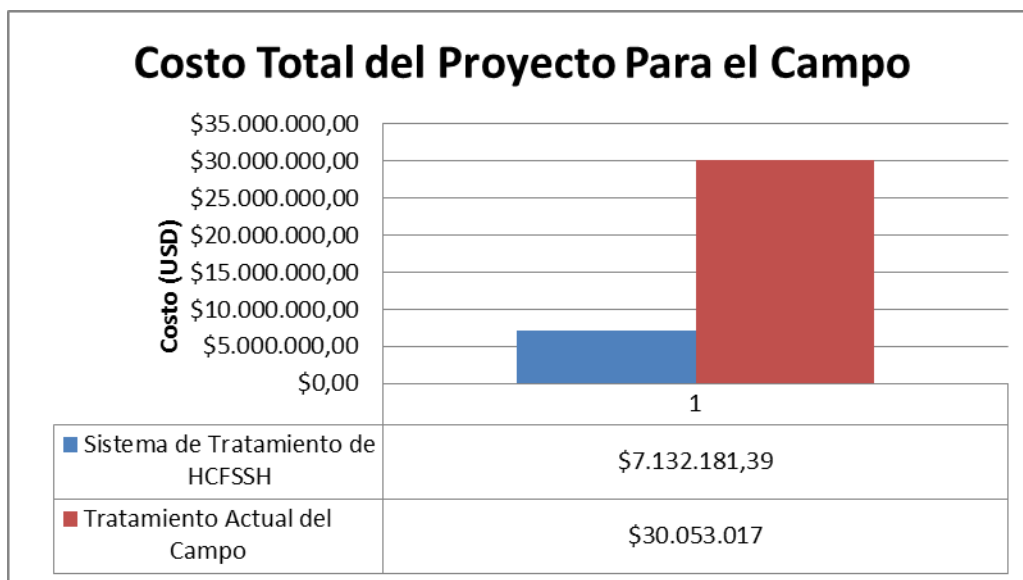
¹³⁸ Kadlec y Knight, Op. cit.

un ambiente natural en zonas usadas anteriormente para tratamiento de aguas industriales. Esto, en comparación con los tratamientos convencionales del agua, agrega un alto valor a la tierra usada y un mejoramiento de zonas naturales en un bloque de operación industrial.

La implementación de humedales construidos en países tropicales como Colombia, constituye una alternativa para optimizar el uso de especies vegetales nativas con potencialidades de fito-depuración y como estrategia de conservación y aprovechamiento adecuado de la biodiversidad.

Con respecto a los costos totales (CAPEX y OPEX) se puede concluir que la gran diferencia de los costos de construcción, operación y mantenimiento del HCFSSH propuesto con respecto al sistema de tratamiento actual del agua de producción del campo, es tan grande, que convierte a los HCFSSH en la tecnología de uso más favorable (figura 30).

Figura 30. Costo Total de los dos sistemas propuestos para el campo.



De forma similar al sistema actual del campo, el HCFSSH muestra un incremento mayor en la etapa de CAPEX con respecto a la etapa de OPEX, así, el 97% de la totalidad de los costos corresponden al CAPEX pero, los costos de OPEX se

tipo de tecnología. En el caso de este proyecto, en la industria petrolera el factor área no sería una limitante, ya que, en los bloques para operación entregados por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) como el del campo colombiano, se tiene una gran extensión (23.424 hectáreas) de terreno que hace viable el sistema de humedales construidos. Además, la notable ventaja por los bajos costos, tanto de construcción como de mantenimiento y operación del sistema, hacen viable el uso de la tecnología al tener una demanda energética y de personal de operación casi nula.

6.5 AGUA DE PRODUCCIÓN Y CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVA AMBIENTAL

El manejo y disposición del volumen de agua de producción fue el principal motivo para la realización del proyecto en el campo petrolero colombiano. Las grandes cantidades de agua producidas suponen un problema inmediato en las operaciones de explotación. La propuesta de un humedal construido surge por la necesidad de buscar alternativas amigables con el medio ambiente, así como por la reducción de los costos de inversión y operación del STAP actual.

Sin embargo, la razón por la que se realizan tratamientos primarios, secundarios y terciarios al agua de producción radica en la necesidad de eliminar gran cantidad de contaminantes provenientes del estrato productor. La normativa ambiental colombiana establece valores máximos permisibles para DBO_5 y SST de 200 mg/L y 180 mg/L respectivamente (Tabla 2), los cuales, inclusive, son mayores que los reportados en el agua de producción del campo (ECOPETROL S.A). En consecuencia, el uso de humedales construidos para la eliminación de materia orgánica y sólidos suspendidos supondría una alternativa descartable. Así mismo, los múltiples sistemas de tratamiento utilizados actualmente manejan costos efectivos que no justifican una reducción tan mínima de la concentración, como en el caso del agua de producción del campo colombiano.

Probablemente, la necesidad de eliminar otros contaminantes tóxicos como metales pesados (Tabla 1) y sustancias orgánicas presentes en el agua de producción, que pueden ser nocivos para los ecosistemas y la salud pública, sea la razón de contar con un eficiente y costoso sistema de tratamiento. No obstante, si se quiere eliminar metales pesados y contaminantes tóxicos del agua de producción, varios estudios han revelado que los HCFSSH también pueden ser eficientes para eliminar metales como cadmio, cobre y cinc, logrando eficiencia de eliminación entre 97-99%¹³⁹

En materia ambiental, el diseño propuesto en el campo cumple con las normativas impuestas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), vertiendo efluentes con concentraciones mucho menores que las establecidas para DBO₅ y SST. En resumen, el STAP del campo colombiano cumple con las mismas exigencias del humedal, pero a costos efectivos mayores.

7. CONCLUSIONES

A lo largo de la investigación se realizaron cálculos, lineamientos y discusiones sobre la tecnología de humedales construidos, aplicado a la industria del petróleo. El reducido conocimiento del sistema en el país llevo a la búsqueda de proyectos realizados a nivel mundial, con el fin de encontrar fundamentos sólidos para la realización de un diseño de un humedal construido en un campo colombiano, con lo cual se concluye:

- El diseño el humedal construido propuesto, se basó en la eliminación de materia orgánica (DBO₅) y sólidos suspendidos totales (SST) del agua de producción de un campo petrolero como parámetros clave en el cálculo del área del humedal. De acuerdo al caudal vertido (107.890 m³/d) y a la concentración de DBO₅ y SST se diseño un sistema de humedales

¹³⁹ Removal of metals and ammonia in constructed wetlands. Ronald W. Crites, Glenn D. Dombeck, Rob C. Watson, Charles R. Williams. Water environment Research, Vol. 69. 1997.

construidos de flujo sub superficial horizontal de aproximadamente 12 ha de área superficial.

- En el diseño también se tuvieron en cuenta otras características como tipo y tamaño del medio granular, vegetación y aspectos climáticos locales.
- Se estimaron los costos efectivos de la construcción, manejo y operación del sistema de tratamiento secundario y terciario para el campo con la tecnología de humedales construidos, dando como resultado un costo total de tratamiento de US\$ 7.132.181,39 en un periodo de tiempo de 10 años de operación.

8. RECOMENDACIONES

Dentro de las sugerencias de parte de los autores a cualquier interesado en la implementación de un sistema de este tipo, se recomienda:

- Evaluar la implementación de un HCFSSH como tratamiento secundario y terciario del agua de producción, ya que se podría reducir los costos de operación en un 97,7%.
- En el presente proyecto se trabajó con un análisis de contaminantes del agua producida por el campo, suministrada por ECOPETROL S.A., el cual muestra que las concentraciones de los parámetros en estudio (DBO_5 y SST) están por debajo de los límites máximos permitidos por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (Capítulo 1, Tabla 2) desde la entrada al STAP actual del campo. En consecuencia, se sugiere hacer una revisión de los costos

efectivos del proyecto, ya que el agua en estudio puede no necesitar ciertas etapas del sistema de tratamiento actual.

- Las bajas concentraciones de contaminante en el agua de producción del campo, sugieren el uso de humedales construidos como tratamiento global del campo, y que el sistema estaría en capacidad de recibir los caudales directamente del sistema de compensación, lavado y surgencia en el múltiple de recolección. De esta manera, los costos efectivos de tratamiento de agua de producción actual (más US\$ 100.000.000) disminuirán en gran proporción.
- La reducción de área requerida es uno de los objetivos presentes en cualquier diseño de este tipo de sistemas de tratamiento. En el diseño del presente proyecto se plantea una propuesta de un sistema de tratamiento que consta de un solo tipo de humedal, el cual es de flujo sub-superficial horizontal, y muestra un requerimiento de área bastante considerable. En la búsqueda de reducción del área se recomienda hacer un rediseño del humedal para implementar un sistema combinado, basado en un humedal construido de flujo sub-superficial horizontal junto con un humedal de flujo superficial, ya que al no requerir altas reducciones en la concentración de contaminantes, el uso de humedales de flujo superficial permite recibir caudales de agua aun mayores sin presentar problemas de colmatación, que constituye una gran desventaja en humedales de flujo sub-superficial.
- Para mayor seguridad de cómo realizar el diseño del sistema de HCFSSH para el campo colombiano a escala real, es necesario el uso de un proyecto piloto que permita observar el comportamiento del sistema a escala de laboratorio y así realizar estudios más precisos, algunos de ellos faltantes en el presente proyecto. La mayoría de los grandes proyectos de la industria, no solo en humedales construidos sino en proyectos para incrementar la producción de

crudo, como recobro mejorado, se utilizan plantas piloto para estudiar la viabilidad ante una posible implementación a escala real.

- Debido a las bajas concentraciones de entrada de los contaminantes, es posible que los datos suministrados por ECOPETROL S.A. estén erróneos, por lo que se recomienda corroborar estos datos, en el caso de que no sean erróneos los datos, significa que el agua en yacimiento está siendo invadida por infiltración desde algún cuerpo de agua subterráneo con condiciones favorables para la disposición en cuerpos de aguas superficiales.

BIBLIOGRAFÍA

- 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.
- ARIAS, C. y BRIX, H., 2007. Desarrollos innovativos en humedales construidos. En: Seminario internacional “Fundamentos y diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales”. Pereira Colombia, Febrero 22 – 24 de 2007.
- ARNOLD, R., BURNETT, D.B., ELPHICK, 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].

- ARNOLD, Ken & STEWART, Maurice. Surface Production Operations. 3 ed. Houston: EISEVIER, 2008.
- Asociación Regional de Empresas del sector Petróleo, gas y biocombustibles en Latinoamérica y el Caribe – ARPEL. Disposición y tratamiento del agua producida. 1992.
- 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.
- BREUER R.S., SCHLICHT T., BAUER NIMR. Produced Water Management Using Wetlands: A Progress Report on the Installation of the First Commercial Wetland Application in the Oil and Gas Industry. SPE 140239.2011. En: Onepetro [base de datos en línea].
- Bureau of Labor Statistics. En: http://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm. Revisado en 2013.
- CASELLES-OSORIO, A., PUIGAGUT, J., SEGÚ, E., VAELLO, N., GRANÉS, F., GARCÍA, D. & GARCÍA, J. Solids accumulation in six full-scale subsurface flow constructed wetlands. Water Research 41. 2007.
- 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.

• Colombia Turismo Web. En:
<http://www.colombiaturismoweb.com/DEPARTAMENTOS/META/MUNICIPIOS/VILLAVICENCIO/VILLAVICENCIO.htm>. Revisado en 2013.

• DAVIS, L. A handbook of constructed wetlands. USDA-Natural Resources Conservation Service and the US Environmental Protection Agency-Region III. 1995. En: <http://www.epa.gov/owow/wetlands/pdf/hand.pdf>

• DAVIS, B. y WALLACE, S. Pilot scale engineered wetland for produced water treatment'. SPE 120257-PA. Septiembre 2009. En: Onepetro [base de datos en línea].

• GARCÍA, J. y CORZO, A. Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya. 2008.

• HUA, G. F., ZHU, W., ZHAO, L.F. & HUANG, J.Y. Clogging pattern in vertical-flow constructed wetlands: Insight from a laboratory study. Journal of Hazardous Materials 180. 2010.

• 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].

- KADLEC, R. H. Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. *Ecological Engineering* 23. 2009.
- KADLEC, R.H. y KNIGHT, R.L. The Use of Treatment Wetlands for Petroleum Industry Effluents. En: *Environmental Science & Technology*. 1999. Vol.33, n.º.7.
- KADLEC, R.H. y WALLACE, S.D. *Treatment Wetlands*. 2 ed. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2009.
- KNOWLES, P. R.; GRIFFIN, P. y DAVIES, P. A. Complementary methods to investigate the development of clogging within a horizontal sub-surface flow tertiary treatment wetland. *Water Research* 44. 2010.
- 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.
- Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. Decreto 4728 de 2010. En: <http://www.minambiente.gov.co>. [revisión 5.0, Octubre, 2012].
- MOSHIRI, G.A. *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Lewis Publishers. Florida. 1993.
- National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES). En: http://cfpub.epa.gov/npdes/home.cfm?program_id=45

- NIJHAWAN, N y MYERS, J. E. Constructed treatment wetlands for the treatment and reuse of produced water in dry climates. SPE 98567-MS. 2-4 Abril 2006. En: Onepetro [base de datos en línea].
- NORMA AMBIENTAL MEXICANA NOM-001-ECOL-1996. En: <http://www.aguascalientes.gob.mx/imae/Leyes/pdfs/NOM-001.pdf>
- Norma de calidad ambiental y de descarga de efluente: recurso agua. 2002. En: <http://cdam.minam.gob.pe/publielectro/calidad%20ambiental/normasrecursoagua.pdf>.
- ÑIQUE, M. Glosario Ambiental Multidisciplinario. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María, Perú. 2008. En: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf/glosario-ambiental-multidisciplinario/glosario-ambiental-multidisciplinario.pdf>. [Revisado: Marzo 5 del 2010].
- PEDESCOLL, A., UGGETTI, E., LLORENS, E., GRANÉS, F., GARCÍA, D. & GARCÍA, J. Practical method based on saturated hydraulic conductivity used to assess clogging in subsurface flow constructed wetlands. Ecological Engineering 35. 2009.
- Produced Water Management Information System. Federal Regulations: U.S. Environmental Protection Agency. En: <http://www.netl.doe.gov/technologies/pwmis/regs/federal/epa/index.html>
- REED, S.C., CRITES, R.W., MIDDLEBROOKS, E.J. Natural Systems for Waste Management and Treatment. 2 ed. McGraw-Hill, 1995.

- Reglamento Ambiental de Actividades Hidrocarburíferas. Decreto Ejecutivo 1215, Registro Oficial 265 de 13 de Febrero del 2001.
- SCHOLZ, M. Wetland systems to control urban Runoff. Elsevier. Edinburg, UK. 2006.
- SILVA, J.P. Humedales Construídos. Fundamentos, Diseño y Operación. Curso Internacional Gestión Integral del Tratamiento de Aguas Residuales. Universidad del Callao – Lima (Perú). 2002.
- USEPA. United state Environmental Protection Agency. Subsurface Constructed Wetland for Wastewater Treatment, a technology assessment. Office of Water Washington, D.C. 1993.
- USEPA. United State Environmental Protection Agency. Subsurface Constructed Wetland for Wastewater Treatment, a technology assessment. Office of Water Washington, D.C.2000a.
- USEPA. United state Environmental Protection Agency. Constructed Wetlands Treatment of Municipal wastewaters, Manual. Office Research and Development Cincinnati, Ohio.2000b.
- VEGA, H. Eliminación de materia orgánica y nitrógeno del agua residual domestica en humedales construidos experimentales plantados con *Cyperus Articulatus*. Trabajo de grado Biólogo. Barranquilla-Colombia. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad del Atlántico, 2013.
- Vertimiento de Aguas Residuales a la Zona Costera y Aguas Marinas — Especificaciones. Norma Cubana Obligatoria. 2007. En:

<http://www.pnuma.org/gobernanza/cd/Recursos/multimedia%20Manejo%20Integraldo%20costero/Documentos/leyes/NC%20521%20Vertimiento%20a%20Zona%20Costera.pdf>

- VYMAZAL, J. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering* 35. 2009.
- VYMAZAL, J. y KRÖPFELOVÁ, L. Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow. *Environmental pollution*. Vol. 14. 2008.
- WALLACE, S. y DAVIS, B. Engineered Wetland Design for On-Site Bioremediation of Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Groundwater and Wastewater. SPE 111515-MS. 15-17 Abril 2008. En: Onepetro [base de datos en línea].
- WANG, L.K., et al. *Environmental Bioengineering. Handbook of environmental engineering*. Vol. 11. Humana Press. 2010.

ANEXO 1

- **Carga de agua:**

$$q = \frac{Q}{A}$$

Donde:

q = Carga hidráulica (HLR), m/d.

Q = Caudal de flujo de agua, m³/d.

A = Área del humedal, m².

- **Tiempo de retención:**

$$\tau = \frac{V_{active}}{Q} = \frac{\emptyset h A_{active}}{Q}$$

Donde:

τ = *Tiempo de retención, d.*

Q = *Caudal, m³/d.*

V_{active} = *Volumen del humedal que contiene agua de flujo activo, m³.*

\emptyset = *Porosidad, adimensional.*

h = *Profundidad del agua del humedal, m.*

A_{active} = *Superficie del humedal que contiene agua en flujo activo, m².*

- **Tiempo de retención nominal:**

$$\tau_n = \frac{V_{\text{nominal}}}{Q} = \frac{(LWh)_{\text{nominal}}}{Q}$$

Donde:

τ_n = *Tiempo de retención nominal, d*

V_{nominal} = *Volumen nominal, m³.*

Q = *Caudal, m³/d.*

- **Tiempo de retención nominal actual:**

$$\tau_{\text{an}} = \tau_i \left(\frac{\ln(R)}{R - 1} \right)$$

Donde:

τ_{an} = *Tiempo de retención nominal actual, d.*

τ_i = Tiempo de retención nominal basado en la entrada de flujo, d.

$R = (Q_o/Q_i)$, Fracción de recobro del agua, adimensional.

- **Velocidad actual del agua:**

$$V = \frac{Q}{\emptyset hW}$$

Donde:

V = Velocidad actual del agua, m/d.

\emptyset = Porosidad, adimensional.

h = Profundidad del agua del humedal, m.

W = Ancho del humedal, m.

- **Velocidad del agua superficial:**

$$u = \frac{Q}{hW}$$

Donde:

u = Velocidad del agua superficial.

Q = Caudal, m³/d.

h = Profundidad del agua del humedal, m.

W = Ancho del humedal, m.

- **Evapotranspiración:**

La radiación solar extraterrestre es obtenida mediante la tabla A, donde se muestran los valores mensuales según la latitud norte del lugar, en miles de julios

por unidad de área, por día. Para realizar la conversión a milímetros por día se multiplica por una constante de 0,408.

Tabla A. Tabla de radiación solar extraterrestre en MJ m⁻² d⁻¹

Latitud Norte	Ene	Feb	Marzo	Abril	Mayo	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	0	2,6	10,4	23	35,2	42,5	39,4	28	14,9	4,9	0,1	0
68	0,1	3,7	11,7	23,9	35,3	42	38,9	28,6	16,1	6	0,7	0
66	0,6	4,8	12,9	24,8	35,6	41,4	38,8	29,3	17,3	7,2	1,5	0,1
64	1,4	5,9	14,1	25,8	35,9	41,2	38,8	30	18,4	8,5	2,4	0,6
62	2,3	7,1	15,4	26,6	36,3	41,2	39	30,6	19,5	9,7	3,4	1,3
60	3,3	8,3	16,6	27,5	36,6	41,2	39,2	31,3	20,6	10,9	4,4	2,2
58	4,3	9,6	17,7	28,4	37	41,3	39,4	32	21,7	12,1	5,5	3,1
56	5,4	10,8	18,9	29,2	37,4	41,4	39,6	32,6	22,7	13,3	6,7	4,2
54	6,5	12	20	30	37,8	41,5	39,8	33,2	23,7	14,5	7,8	5,2
52	7,7	13,2	21,1	30,8	38,2	41,6	40,1	33,8	24,7	15,7	9	6,4
50	8,9	14,4	22,2	31,5	38,5	41,7	40,2	34,4	25,7	16,9	10,2	7,5
48	10,1	15,7	23,3	32,2	38,8	41,8	40,4	34,9	26,6	18,1	11,4	8,7
46	11,3	16,9	24,3	32,9	39,1	41,9	40,6	35,4	27,5	19,2	12,6	9,9
44	12,5	18	25,3	33,5	39,3	41,9	40,7	35,9	28,4	20,3	13,9	11,1
42	13,8	19,2	26,3	34,1	39,5	41,9	40,8	36,3	29,2	21,4	15,1	12,4
40	15	20,4	27,2	34,7	39,7	41,9	40,8	36,7	30	22,5	16,3	13,6
38	16,2	21,5	28,1	35,2	39,9	41,8	40,8	37	30,7	23,6	17,5	14,8
36	17,5	22,6	29	35,7	40	41,7	40,8	37,4	31,5	24,6	18,7	16,1
34	18,7	23,7	29,9	36,1	40	41,6	40,8	37,6	32,1	25,6	19,9	17,3
32	19,9	24,8	30,7	36,5	40	41,4	40,7	37,9	32,8	26,6	21,1	18,5
30	21,1	25,8	31,4	36,8	40	41,2	40,6	38	33,4	27,6	22,2	19,8
28	22,3	26,8	32,2	37,1	40	40,9	40,4	38,2	33,9	28,5	23,3	21
26	23,4	27,8	32,8	37,4	39,9	40,6	40,2	38,3	34,5	29,3	24,5	22,2
24	24,6	28,8	33,5	37,6	39,7	40,3	39,9	38,3	34,9	30,2	25,5	23,3
22	25,7	29,7	34,1	37,8	39,5	40	39,6	38,4	35,4	31	26,6	24,5
20	26,8	30,6	34,7	37,9	39	39,1	38,9	38,2	36,1	32,5	28,7	25,6
18	27,9	31,5	35,2	38	39	39,1	38,9	38,2	36,1	32,5	28,7	26,8
16	28,9	32,3	35,7	38,1	38,7	38,6	38,5	38,1	36,4	33,2	29,6	27,9
14	29,9	33,1	36,1	38,1	38,4	38,1	38,1	38	36,7	33,9	30,6	28,9
12	30,9	33,8	36,5	38	38	37,6	37,6	37,8	36,9	34,5	31,5	30
10	31,9	34,5	36,9	37,9	37,6	37	37,1	37,5	37,1	35,1	32,4	31
8	32,8	35,2	37,2	37,8	37,1	36,3	36,5	37,2	37,2	35,6	33,3	32
6	33,7	35,8	37,4	37,6	36,6	35,7	35,9	36,9	37,3	36,1	34,1	32,9
4	34,6	36,4	37,6	37,4	36	35	35,3	36,5	37,3	36,6	34,9	33,9
2	35,4	37	37,8	37,1	35,4	34,2	34,6	36,1	37,3	37	35,6	34,8
0	36,2	37,5	37,9	36,8	34,8	33,4	33,9	35,7	37,2	37,4	36,3	35,6

Fuente. Sánchez San Román F.J.-Dpto. Geología Univ. Salamanca. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves.

Para obtener un valor de evapotranspiración independiente del mes del año, se tomó un promedio de los valores de cada mes para la latitud norte donde se encuentra ubicado el campo. Una vez hallada la radiación solar extraterrestre, la evapotranspiración fue determinada:

$$ET_0 = 0,0023(27 + 17.78)(35,96 * 0,408) * (30 - 15)^{0,5} = 5,85 \frac{mm}{dia}$$

ANEXO 2

Descripción del esquema del HCFSSH propuesto para el campo colombiano:

1. **Múltiple de recolección:** En esta zona el fluido de producción es recolectada por el múltiple de recolección, y es dirigido hacia la zona de tratamiento primario a través de una línea de flujo.
2. **Etapa primaria de tratamiento:** En esta zona se lleva a cabo la etapa de tratamiento primario, en donde se separa el agua del aceite de producción, para así, direccionar independientemente los fluidos al sistema de Humedales Construidos y al sistema de tratamiento del aceite, respectivamente.
3. **Estanque Buffer:** El agua de producción llega al “Buffer” en donde tiene una etapa de almacenamiento para así ser distribuida en 12 trayectorias de flujo en paralelo, conformada cada una por 5 celdas en serie.
4. **Humedal:** En esta zona el agua a tratar pasa por 60 celdas de 33,33m de ancho por 60m largo, que conforman el sistema de humedales.
5. **Línea de recolección:** El agua que fluye por las 12 trayectorias del humedal desemboca en una línea de recolección, pasando por un controlador de nivel y direccionándose de nuevo por las líneas de flujo.
6. **Bombeo:** El agua ya tratada por el sistema de humedales pasa por un foso de quietamiento, para después acumularse en el foso de vertimiento donde las bombas impulsaran el agua hacia las líneas de vertimiento.
7. **Línea de vertimiento:** En la línea de vertimiento el agua tratada es direccionada hacia el lugar de disposición de esta.

