

**MODELAMIENTO MEDIANTE DINÁMICA DE SISTEMAS DE LA  
COLMATACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO  
SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL PARA TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES DOMÉSTICAS**

**GERMAN DAVID RAMÍREZ FIGUEROA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA  
BUCARAMANGA-COLOMBIA**

**2015**

**MODELAMIENTO MEDIANTE DINÁMICA DE SISTEMAS DE LA  
COLMATACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO  
SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL PARA TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES DOMÉSTICAS**

**GERMAN DAVID RAMÍREZ FIGUEROA**

**Trabajo de Investigación presentado como requisito para optar el título de  
INGENIERO DE SISTEMAS**

**DIRECTOR**

**Msc. HUGO HERNANDO ANDRADE SOSA**

**Profesor Titular**

**Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática**

**CODIRECTOR:**

**Ing. ANGÉLICA CORZO HERNÁNDEZ**

**Magister (c) Ing. Civil Universidad Industrial de Santander**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA  
BUCARAMANGA-COLOMBIA**

**2015**

## DEDICATORIA

*A Eddy Teresa Figueroa Gómez mi mamá.*

*A Pilar Eliana Veloza Figueroa mi hermana.*

*A Jhon Alex Leguizamón Figueroa mi sobrino.*

*Y a todas las personas nombradas en los agradecimientos, porque de una u  
otra forma contribuyeron en este objetivo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme la fortaleza día tras día para lograr esta meta.

A el maestro Hugo Hernando Andrade Sosa por su acompañamiento, comprensión, valioso apoyo en diferentes situaciones, rigurosidad para llevar las cosas a otro nivel y proponer siempre hacer más de lo necesario.

A la ingeniera Angélica Corzo Hernández por su apoyo, dirección y seguimiento.

A Mayra Geraldine Gutiérrez Cubides mi hermosa novia por apoyarme incondicionalmente de muchas formas en todas las etapas del proyecto y motivarme en los momentos difíciles, Geral Mil Gracias!.

A Harvey Orlando Figueroa Gómez, por confiar en mis capacidades y ser mi respaldo con mi crédito educativo.

A el equipo proyecto vSpace, Miguel, Ramón, Cristian, Lucho, Carlos, John, y Dany por hacer de mi práctica universitaria una experiencia de aprendizaje muy enriquecedora.

A la familia Tecnología en Regencia de Farmacia UIS, lugar en donde compartí gratos momentos durante tres años de auxiliatura, Jova, Zoraida, Liliana, Ana, Ricardo y demás miembros del Programa muchas gracias.

A todos mis tíos, gracias porque contribuyeron en diferentes momentos y de diferentes maneras para hacer esta meta posible.

A la Sede Málaga y todos mis amigos que iniciaron conmigo la vida universitaria, Aider y Vanessa gracias por todos los momentos compartidos.

A Danny, Ricardo, Sergio, Ana, Karime y a todos mis amigos de la Sede Principal Bucaramanga.

A el Grupo de Investigaciones SIMON, Escuela de Ingeniería de Sistemas, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander en general, Comunidad Colombiana y Latinoamericana de Dinámica de Sistemas.

## CONTENIDO

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	18
2. JUSTIFICACIÓN .....	20
3. OBJETIVOS .....	23
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	23
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
4. ESTADO DEL ARTE .....	24
4.1 HUMEDALES CONSTRUIDOS .....	25
4.1.1 Aplicabilidad.....	26
4.1.2 Elementos que componen un Humedal. ....	27
4.1.2.1 Agua Residual. ....	28
4.1.2.2 Impermeabilización. ....	28
4.1.2.3. Estructura de entrada y salida. ....	28
4.1.2.4. Medio granular. ....	29
4.1.2.5 Plantas.....	30
4.2 FENÓMENO DE COLMATACIÓN DE HUMEDALES.....	30
4.2.1 Tipos de Colmatación .....	31
4.2.2 Análisis de colmatación en humedales. ....	32
4.2.3 Colmatación en Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal.....	34
4.3 TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN RELACIONADOS.....	35
5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	40
5.1 DINÁMICA DE SISTEMAS .....	40
5.2 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES.....	41
6. DISEÑO METODOLOGICO .....	45
6.1 METODOLOGÍA DE DINÁMICA DE SISTEMAS.....	45

6.2 METODOLOGÍA DE DESARROLLO DEL MODELO .....	47
6.2.1 Herramienta Computacional. ....	47
6.2.2 Fases de Desarrollo. ....	50
7. PROTOTIPO INICIAL.....	52
7.1 LENGUAJE EN PROSA.....	52
7.2 LENGUAJE EN DIAGRAMA DE INFLUENCIAS .....	53
7.3 LENGUAJE EN DIAGRAMA DE FLUJOS Y NIVELES.....	56
7.4 LENGUAJE DE ECUACIONES .....	60
7.5 LENGUAJE DE COMPORTAMIENTOS .....	60
7.5.1 Escenario de Simulación.....	60
7.5.2 Análisis de sensibilidad.....	64
8. PROTOTIPO FINAL .....	67
8.1 LENGUAJE EN PROSA.....	67
8.1.1 Fenómeno de la colmatación.....	67
8.1.2 Funcionamiento de un HCFSSH.....	67
8.1.3 Factores de diseño. ....	68
8.1.3.1 Dimensionamiento biológico .....	69
8.1.3.2 Dimensionamiento Hidráulico .....	71
8.2 LENGUAJE EN DIAGRAMA DE INFLUENCIAS .....	77
8.3 LENGUAJE DE FLUJOS Y NIVELES.....	77
8.3.1 Sector 1. Factores de Diseño:.....	79
8.3.1.1 Subsector 1.1. Configuración Inicial. ....	80
8.3.1.2 Subsector 1.2 Configuración recomendada HCFSSH. . ....	80
8.3.1.3 Subsector 1.3 Caudal de Entrada. ....	80
8.3.1.4 Subsector 1.4 Diseño. ....	80
8.3.2 Sector 2. Interacción Sólidos Inorgánicos.....	82
8.3.3 Sector 3. Interacción Sólidos Orgánicos– Biopelícula– Plantas. ....	83
8.3.4 Sector 4 Obstrucción plantas.....	84
8.3.5 Sector 5 Factores de Diseño 2.....	84
8.4 LENGUAJE DE ECUACIONES .....	86

8.5 LENGUAJE DE COMPORTAMIENTOS .....	86
9. PRUEBAS DE VALIDACIÓN DEL MODELO .....	90
9.1 PRUEBAS DE SUFICIENCIA DE LOS LÍMITES .....	91
9.2 PRUEBAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA .....	93
9.3 PRUEBAS DE CONSISTENCIA DIMENSIONAL .....	94
9.4. PRUEBAS DE EVALUACIÓN DE PARÁMETROS .....	95
9.5 CONDICIONES EXTREMAS .....	95
9.6. PRUEBA ERROR DE INTEGRACIÓN .....	97
9.7 PRUEBAS DE COMPORTAMIENTOS ANÓMALOS.....	101
9.8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	101
9.9 CRITERIO DE UTILIDAD.....	103
9.10 CRITERIO DE CONFIANZA .....	103
9.11 DOCUMENTACIÓN .....	104
9.11.1 Descripción de Elementos. ....	104
9.11.2 Evolución de prototipos.....	104
10. EXPERIMENTOS GUIADOS SIMULADOS .....	105
10.1 USUARIO BÁSICO .....	105
10.2 USUARIO EXPERTO .....	106
11. AMBIENTE SOFTWARE “HUMEDALES CFSSH 2015” .....	110
11.1 DISEÑO AMBIENTE SOFTWARE.....	110
11.2 TIPOS DE USUARIO DE LOS SIMULADORES.....	114
11.3 DESCRIPCIÓN DE ACTORES.....	114
11.4 DIAGRAMAS DE CASOS DE USO .....	116
11.5 ESPECIFICACIÓN DE CASOS DE USO.....	118
12. LOGROS Y DIFUSIÓN.....	125
13. CONCLUSIONES.....	126
14. RECOMENDACIONES .....	128
BIBLIOGRAFÍA.....	130
ANEXOS .....	134

## LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Comparación de herramientas software para el modelado y simulación con DS .....	42
Tabla 2. Elementos diagrama de influencias .....	56
Tabla 3. Escenario modo de referencia .....	60
Tabla 4. Constante Cinética KA .....	70
Tabla 5. Tipo de Gravas .....	72
Tabla 6. Porosidad y Conductividad Hidráulica Promedio para Modelado en Evolución .....	73
Tabla 7. Influencia de la temperatura en la eliminación de contaminantes .....	74
Tabla 8. Parámetros del escenario base .....	87
Tabla 9. Resultados de simulación escenario base .....	88
Tabla 10. Elementos Endógenos y Exógenos .....	91
Tabla 11. Límites parámetros exógenos .....	92
Tabla 12. Errores de integración. Método de Euler .....	97
Tabla 13. Comportamiento del sistema con diferentes pasos de integración. Método de Euler .....	97
Tabla 14. Errores de integración. Método de Runge Kutta .....	99
Tabla 15. Comportamiento del sistema con diferentes pasos de integración. Método de Runge Kutta .....	99
Tabla 16. Resultado Análisis de Sensibilidad Volumen/ Vida Útil .....	102
Tabla 17. Resultado Análisis de Sensibilidad Caudal de Entrada/ Volumen .....	103
Tabla 18. Parámetros escenario sin plantas .....	108
Tabla 19. Descripción usuario básico .....	114
Tabla 20. Descripción usuario experto .....	115
Tabla 21. Descripción caso de uso guardar simulación .....	118
Tabla 22. Descripción caso de uso abrir simulación .....	118
Tabla 23. Descripción caso de uso abrir modelo en Evolución .....	119
Tabla 24. Descripción caso de uso guardar modelo en Evolución .....	120
Tabla 25. Descripción caso de uso visualizar resultados de simulación I .....	120
Tabla 26. Descripción caso de uso visualizar resultados de simulación II .....	121
Tabla 27. Descripción caso de uso iniciar Simulación .....	122
Tabla 28. Descripción caso de uso pausar simulación .....	122
Tabla 29. Descripción caso de uso detener simulación .....	123
Tabla 30. Descripción caso de uso modificar parámetros de simulación .....	123
Tabla 31. Descripción caso de uso elegir tiempo de simulación .....	124

## LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Esquema de humedal de flujo subsuperficial horizontal .....	27
Figura 2. Modelado con Dinámica de Sistemas.....	47
Figura 3. Diagrama de Flujo Nivel y Diagrama de Influencias .....	49
Figura 4. Simulación de Comportamiento .....	50
Figura 5. Hipótesis Dinámica Básica .....	55
Figura 6. Modo de Referencia.....	55
Figura 7. Interacción Sólidos Inorgánicos .....	57
Figura 8. Interacción Sólidos Orgánicos, Biopelícula, Plantas Adultas .....	57
Figura 9. Dinámica de las plantas.....	58
Figura 10. Dinámica de la porosidad .....	59
Figura 11. Comportamiento de la estructura inicial.....	61
Figura 12. Colmatación del humedal .....	64
Figura 13. Análisis de sensibilidad.....	65
Figura 14. Hipótesis Dinámica Básica .....	77
Figura 15. Mapa de sectores .....	78
Figura 16. Sector 1. Factores de diseño .....	79
Figura 17. Sector 2. Interacción Sólidos Inorgánicos.....	82
Figura 18. Sector 3. Interacción Sólidos Orgánicos– Biopelícula– Plantas.....	83
Figura 19. Sector 4. Obstrucción plantas.....	84
Figura 20. Sector 5. Factores de Diseño 2 .....	85
Figura 21. Comportamiento de la estructura escenario base .....	88
Figura 22. Comportamiento de la porosidad escenario base.....	89
Figura 23. Estructura del sistema .....	93
Figura 24. Comportamiento de la porosidad en un HCFSSH sin plantas .....	96
Figura 25. Comportamiento de la porosidad en un HCFSSH con exceso de plantas .....	96
Figura 26. Estructura sin intervención de la biopelícula.....	101
Figura 27. Comportamiento del sistema en Modo Batch .....	107
Figura 28. Análisis de sensibilidad por variación de escenarios .....	109
Figura 29. Pantalla principal ambiente software Humedales CFSSH 2015 .....	111
Figura 30. Pantalla Metodología de los cinco lenguajes .....	112
Figura 31. Pantalla información .....	113
Figura 32. Identificación de actores de los simuladores .....	114
Figura 33. Diagrama caso de uso usuario básico .....	116
Figura 34. Diagrama caso de uso usuario experto .....	117

## ANEXOS

	Pág.
Anexo A. LENGUAJE DE ECUACIONES PROTOTIPO INICIAL .....	134
Anexo B. LENGUAJE DE ECUACIONES PROTOTIPO FINAL.....	137
Anexo C. DOCUMENTACIÓN ELEMENTOS DEL MODELO.....	143
Anexo D. EVOLUCIÓN DEL MODELADO.....	165
Anexo E. INTERFACES AMBIENTE SOFTWARE HUMEDALES CFSSH 2015 .....	174

## RESUMEN

**TÍTULO:** MODELAMIENTO MEDIANTE DINÁMICA DE SISTEMAS DE LA COLMATACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS<sup>1</sup>

**AUTOR:** GERMAN DAVID RAMÍREZ FIGUEROA\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Colmatación de humedales, Dinámica de Sistemas, Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal, Parámetros de diseño.

**DESCRIPCIÓN:** Los humedales artificiales como tecnología no convencional son una opción para el saneamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones (menos de 2000 habitantes), sin embargo, una de las fallas que presentan estos sistemas, es la colmatación del lecho granular, que consiste en la pérdida de volumen útil del humedal debido a la reducción del tamaño de los poros del medio granular, éste fenómeno reduce significativamente la vida útil del sistema.

Para explorar alternativas de mejora de esta problemática, en este estudio se propuso desarrollar un modelo que permitiera identificar los elementos de mayor incidencia en este fenómeno asociados a los parámetros de diseño, con el fin de mejorar su eficiencia.

Es así como esta investigación documenta la experiencia de abordar el problema de colmatación en humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal, utilizando la metodología del modelado estructural con Dinámica de Sistemas para construir prototipos de complejidad y cobertura creciente, desde la etapa de interpretación del fenómeno hasta la construcción del prototipo funcional final.

El documento inicia con el desarrollo del primer prototipo, el cual fue presentado y aceptado como ponencia en el XII Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas (ECDS), seguido del prototipo final y la construcción del ambiente software (interfaz gráfica) que le permite al usuario operar con mayor facilidad el modelo.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Hugo Hernando Andrade Sosa, Magister en Informática.

## ABSTRACT

**TITLE:** MODELING BY SYSTEM DYNAMICS OF THE CLOGGING PROCESS IN HORIZONTAL SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS TREATING DOMESTIC WASTEWATER.

**AUTHOR:** GERMAN DAVID RAMÍREZ FIGUEROA\*\*

**KEYWORDS:** CLOGGING OF WETLANDS, SYSTEM DYNAMICS, HORIZONTAL SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS, DESIGN PARAMETERS.

**DESCRIPTION:** Constructed wetlands as non-conventional technology are an option for the treating domestic wastewater in small towns (less than 2000 inhabitants), however, one of the faults of these systems is the clogging of the granular bed, which is the loss wetland useful volume due to the reduced size of the pores of the granular medium, this phenomenon significantly reduces the life of the system.

To explore alternatives for improvement of this problem, in this study proposed to develop a model to identify the elements of greatest impact on this phenomenon associated with design parameters, to improve its efficiency.

Thus, this research documents the experience to tackle the problem of clogging in constructed wetlands horizontal subsurface flow, using the methodology of structural modeling with System Dynamics to build prototypes of complexity and increased coverage, from the stage of interpreting the phenomenon to construction of the final working prototype.

The document begins with the development of the first prototype, which was presented and accepted as a paper at the XII Ecuentero Colombiano de Dinámica de Sistemas (ECDS), followed by the final prototype and developing environment software (GUI) that allows the user more easily operate the model.

---

\*\* Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Hugo Hernando Andrade Sosa, Magister en Informática.

## INTRODUCCIÓN

“El agua y el saneamiento son uno de los principales motores de la salud pública”.<sup>2</sup> En Colombia el acceso al agua potable y el saneamiento de aguas residuales presenta importantes desafíos debido a la cobertura insuficiente y la calidad de los servicios, especialmente en zonas rurales, lo que acarrea problemas de salud pública.

A nivel mundial se ha observado una tendencia creciente en el uso de humedales artificiales, ya que son una opción para el saneamiento en núcleos de población pequeños (hasta 2000 habitantes equivalentes), depurando aguas residuales de diverso origen tales como doméstico, industrial, lixiviados de vertedero, entre otros. Esta tecnología no convencional consigue altas eficiencias de remoción de contaminantes.

Sin embargo, una de las fallas que presentan estos sistemas es la colmatación del lecho granular, que se representa como un proceso complejo que involucra los sólidos inertes retenidos, el crecimiento de biopelícula, los productos de desintegración de las plantas, el desarrollo de raíces y rizomas en el medio granular y la precipitación química.

La colmatación consiste en la pérdida de volumen útil debido a la reducción del tamaño de los poros del medio granular, repercutiendo en la disminución de la conductividad hidráulica. Este proceso puede ser simulado mediante el uso de

---

<sup>2</sup> DR. LEE, Jong-wook. Relación del agua, el saneamiento y la higiene con la salud. Organización Mundial de la Salud. 2004

modelos dinámicos, sin embargo son pocos los investigadores que en la comunidad científica del tratamiento de aguas han abordado el fenómeno utilizando esta metodología.

Hasta hace pocos años los modelos en el ámbito del tratamiento del agua residual mediante humedales de tipo subsuperficial, tienen en consideración las relaciones y las realimentaciones que suceden en su interior, en los estudios y especialmente en su diseño, generalmente se trabaja con ellos como modelos de caja negra, debido a que no se han esclarecido completamente las interacciones que allí se llevan a cabo.

La necesidad de dar respuesta a esta realidad cambiante y dinámica en la cual los modelos tradicionales han dado una respuesta insuficiente, genera un espacio de investigación profundo, en donde la Dinámica de Sistemas propone una aproximación diferente al paradigma dominante en el que los problemas se entienden como estados predecibles, estables, ordenados, lineales y controlables.

En consideración a lo anterior, este proyecto de grado documenta la experiencia de abordar el problema de colmatación en humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal, utilizando la metodología de dinámica de sistemas, desde la etapa de interpretación del fenómeno hasta la construcción del prototipo funcional final.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal- HCFSSH son considerados una tecnología no convencional en el tratamiento de aguas residuales, en donde el costo energético es bajo o nulo y además tienen una alta integración con el medio ambiente, su principal objetivo es la eliminación de sólidos en suspensión, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, microorganismos patógenos y metales.

En la revisión bibliográfica realizada por Knowles *et al.* (2010)<sup>3</sup> se afirma que los primeros diseños documentados en 1991, pronosticaban una vida útil de 50 a 100 años (Conley *et al.*), más adelante en 1993 se hablaba de 15 años (Bavor y Schulz), mientras que en el 2006 el estimado era de 10 años (Wallace y Knight) y para el 2008 se estimaba una vida útil de 8 años (Griffin *et al.*), estas cifras evidencian que el pronóstico de vida útil de los humedales va disminuyendo con el tiempo a medida que se profundiza en su estudio y evaluación.

La causa de este fenómeno radica en que con el paso del tiempo, algunos de los contaminantes removidos, se acumulan permaneciendo en el sistema ligados al sedimento y a la biopelícula bacteriana, ocasionando una disminución en la conductividad hidráulica y la porosidad inicial del medio granular (arena, grava, gravilla), este hecho “conduce al desarrollo de caminos preferenciales y cortocircuitos en el curso del agua que convergen en la aparición de agua en superficie”<sup>4</sup>, repercutiendo en olores, presencia de insectos y potencial reducción de la eficiencia del tratamiento. “A la larga, esto puede comprometer la capacidad

---

<sup>3</sup> KNOWLES, Paul *et al.* Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors. *En: Ecological Engineering*. Octubre, 2010. vol.37. p. 99-112.

<sup>4</sup> PEDESCOLL ALBACAR, Anna. Colmatación en Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal. Tesis Doctoral Tecnología Agroalimentaria y Biotecnología. Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. 2010. p. 25.

depurativa del sistema. Por ello, la colmatación supone el factor limitante de la vida útil de un humedal construido”.<sup>5</sup>

Debido a esto entender el desarrollo de este fenómeno será un paso de gran importancia para proponer soluciones a esta problemática, sustentada en un modelo matemático de simulación en dinámica de sistemas, que contemple los elementos fundamentales para describir la dinámica del proceso de colmatación al interior de los humedales.

Con la construcción de dicho modelo se logrará definir los criterios de diseño de estos sistemas que permitan reducir el fenómeno de colmatación y mejorar su eficiencia, pues la dinámica de sistemas permite crear modelos de simulación en donde se pueden construir diferentes escenarios, probar políticas y simular comportamientos que pueden ayudar en esta tarea investigativa.

---

<sup>5</sup> *Ibíd.*

## 2. JUSTIFICACIÓN

La Declaración del Milenio aprobada por los Estados miembros de la Organización de las Naciones Unidas- ONU en septiembre del año 2000, incluía dentro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio-ODM para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, la meta de reducir a la mitad para el año 2015 el porcentaje de personas sin acceso sostenible al agua potable y a servicios básicos de saneamiento, tomando como línea base el año 1990. Colombia, definió metas superiores a las establecidas internacionalmente, lo que significa que desde 1993<sup>6</sup> y hasta el 2015 el país debe alcanzar una cobertura de acueducto del 99% en el área urbana y del 78% en el área rural y llegar a un indicador de cobertura de alcantarillado de 93% en el área urbana y 72% en el área rural, incluyendo soluciones alternativas.

Según cifras de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico<sup>7</sup> durante el año 2013 Colombia estaba a 2 puntos porcentuales de alcanzar todas las metas establecidas dentro de los ODM, excepto la de cobertura de acueducto rural en la que se hallaba una diferencia de 5 puntos porcentuales (p.p.).

Si bien es cierto, el país ha avanzado en el incremento de las coberturas de estos servicios, esto ha generado un mayor volumen de residuos líquidos (proveniente del aumento en la demanda de agua), cuyo vertimiento sin una adecuada recolección, evacuación y tratamiento conlleva a deteriorar la calidad del agua y a generar problemas de disponibilidad del recurso hídrico y salubridad pública.

---

\* Colombia utiliza como línea base la información de coberturas calculadas a partir de los datos del Censo de 1993.

<sup>7</sup> COLOMBIA. CRA COMISIÓN DE REGULACIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Evolución de las coberturas de los servicios de acueducto y alcantarillado (1985-2013).p. 52

Dicha problemática se ve reflejada en el diagnóstico general del Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales en Colombia, donde se afirma que “actualmente son muchas las corrientes hídricas que se ven afectadas por la creciente contaminación generada por los vertimientos de aguas residuales, generando condiciones anóxicas (casos ríos Bogotá, Medellín, Cali, Sogamoso, etc.). También se ha incrementado la problemática de eutrofización de cuerpos de agua, como sucede en las Lagunas de Fúquene y Sonzo, y los humedales en la Sabana de Bogotá”.<sup>8</sup>

De aquí, la importancia de definir estrategias para la gestión y manejo de aguas residuales, dentro de las cuales se fomenten nuevas alternativas para su debido tratamiento, con el fin de controlar la contaminación de suelos, aguas subterráneas, cuerpos de aguas y evitar problemas de salubridad.

Es así, como los humedales artificiales se presentan como una alternativa para el tratamiento principal o complementario de aguas residuales, ya que proporcionan un tratamiento efectivo con porcentajes de remoción por encima del 90% de carga contaminante, representada en Demanda Biológica de Oxígeno-DBO y a la vez que minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores calificados, su costo de construcción es menor en comparación con los procesos mecánicos de tratamiento diseñados para un nivel equivalente de calidad de efluente, no producen lodos residuales y son muy efectivos en la remoción de la DBO, la Demanda Química de Oxígeno-DQO, los metales y algunos compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas.

Este tipo de sistemas pueden solventar los problemas de saneamiento de pequeños municipios en Colombia y a nivel mundial. Sin embargo, resulta necesario efectuar mejoras en su diseño, contribuyendo a aumentar su eficiencia y disminuir

---

<sup>8</sup> COLOMBIA. Plan nacional de manejo de aguas residuales municipales en Colombia .Bogotá D.C. 2004. p. 8.

fenómenos que afectan su rendimiento y vida útil como es la colmatación del lecho granular.

Por lo anterior, este proyecto busca aportar una solución al fenómeno de la colmatación, a través de la aplicación de metodologías ingenieriles, visualizando su comportamiento a través del lenguaje de la dinámica de sistemas y creando escenarios que permitan identificar los factores de diseño que afectan la eficiencia de estos sistemas.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Formular un modelo matemático de simulación, con enfoque estructural y mediante dinámica de sistemas, y un ambiente software para su uso, que contemple los elementos fundamentales para describir la dinámica del fenómeno de colmatación de humedales.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Formular un modelo matemático de simulación que permita determinar los factores de diseño de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal que afectan la eficiencia del sistema y producen colmatación en el medio granular, mediante dinámica de sistemas utilizando los recursos del software evolución 4,5.
- Desarrollar una interfaz gráfica que permita interactuar con los factores de diseño del humedal para minimizar el fenómeno de colmatación de humedales, mediante experimentos guiados simulados con el modelo.

#### 4. ESTADO DEL ARTE

Dentro de las principales ventajas de los HCFSSH se encuentra que al mantener un nivel de agua por debajo de la superficie del lecho filtrante se previene la generación de mosquitos, olores y el riesgo de que el público entre en contacto con el agua residual parcialmente tratada, proporcionan tratamiento efectivo y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores calificados, por lo que su costo de mantenimiento es menor en comparación con los procesos mecánicos de tratamiento, requieren una extensión de terreno menor para lograr los mismos caudales y objetivos de calidad del agua en comparación con los humedales de flujo libre.

Este tipo de sistemas son comunes en diferentes partes del mundo, países desarrollados como Estados Unidos, Alemania, Inglaterra, Francia, Dinamarca, Polonia e Italia, hacen uso de este tipo de tecnologías que también son apropiados a países en desarrollo.

“El esquema típico de un humedal de flujo horizontal es un lecho impermeabilizado y relleno de un material granular donde el agua circula horizontalmente de un extremo al otro del sistema. Una tubería perforada colocada en el fondo del lecho recoge el agua tratada. El colector de salida es regulable en altura, lo que permite ajustar el nivel del agua dentro del humedal.”<sup>9</sup>

Aunque esta tecnología permite conseguir rendimientos altos de eliminación de contaminantes (DBO<sub>5</sub> 75%, DQO 90%, sólidos 80%, nitrógeno 35%, etc.), su vida útil es reducida por el fenómeno de colmatación.

---

<sup>9</sup> PEDESCOLL ALBACAR, Anna. Colmatación en Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal. Tesis Doctoral. Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. 2010. p. 34.

Es así como se ha convertido en objeto de estudio la formulación de un modelo matemático que permita identificar los factores de diseño de dichos sistemas que conlleven a generar una mayor eficiencia (aumento en la vida útil), a través de la reducción en el fenómeno de la colmatación.

A nivel mundial diversas investigaciones se han enfocado en caracterizar el proceso de la colmatación, sin embargo, no se ha realizado un estudio en el que se determine la influencia e interrelación de los parámetros de diseño (porosidad, carga orgánica, carga de sólidos, entre otros) en la ocurrencia del fenómeno.

#### **4.1 HUMEDALES CONSTRUIDOS**

“La mejora en la calidad del agua en humedales naturales ha sido observada por científicos e ingenieros durante muchos años, y ha llevado al desarrollo de humedales artificiales para replicar en ecosistemas construidos los beneficios de calidad del agua y hábitat de los humedales naturales”,<sup>10</sup> este desarrollo ha demostrado que los humedales construidos poseen una capacidad significativa tanto para el tratamiento de aguas residuales como para la recuperación de recursos hídricos.

Por esta razón, han sido definidos como “sistemas de ingeniería, diseñados y construidos para utilizar las funciones naturales de los humedales, de la vegetación, los suelos y de sus poblaciones microbianas para el tratamiento de contaminantes en aguas residuales”<sup>11</sup>.

Históricamente, los humedales naturales fueron utilizados como sitios de descarga de las aguas residuales. Esto se dio principalmente como medio de eliminación,

---

<sup>10</sup> ESTADOS UNIDOS. EPA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales-Humedales de flujo subsuperficial. Washington, D.C. 2000. p.1.

<sup>11</sup> ITRC INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL. Technical and regulatory guidance document for constructed treatment wetlands. 2003.

más no de tratamiento, esta tendencia conlleva a muchos humedales a saturarse de nutrientes y posteriormente a degradarse ambientalmente.

Los primeros experimentos destinados a probar la capacidad de tratar aguas residuales en humedales artificiales fueron realizados por la Dra. Kathe Seidel en la década del cincuenta en el Instituto Max Planck de Plön, Alemania, donde el reporte científico señala las posibilidades que tienen las plantas emergentes para la remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales; en su investigación la Dra. Seidel plantea que mediante el empleo del junco común (*Schoenoplectus lacustris*) era posible la remoción de una serie de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas, así como la desaparición de bacterias presentes en este tipo de aguas.

**4.1.1 Aplicabilidad.** En los años noventa se vio un aumento en el número de estos sistemas debido a la ampliación de tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales (domésticas, industriales y aguas pluviales). Actualmente los humedales artificiales pueden ser utilizados para una variedad de aplicaciones:<sup>12</sup>

- Tratamiento de aguas residuales domésticas o aguas grises
- Tratamiento terciario de efluentes pretratados en plantas convencionales
- Tratamiento de aguas residuales industriales (desechos de refinerías de petróleo, drenaje ácido de minas, desechos agrícolas, efluentes de fábricas de pulpa y de papel o fábricas textiles)
- Tratamiento y retención de aguas pluviales
- Tratamiento natural para agua de piscinas (sin cloro), ríos y lagos contaminados.

---

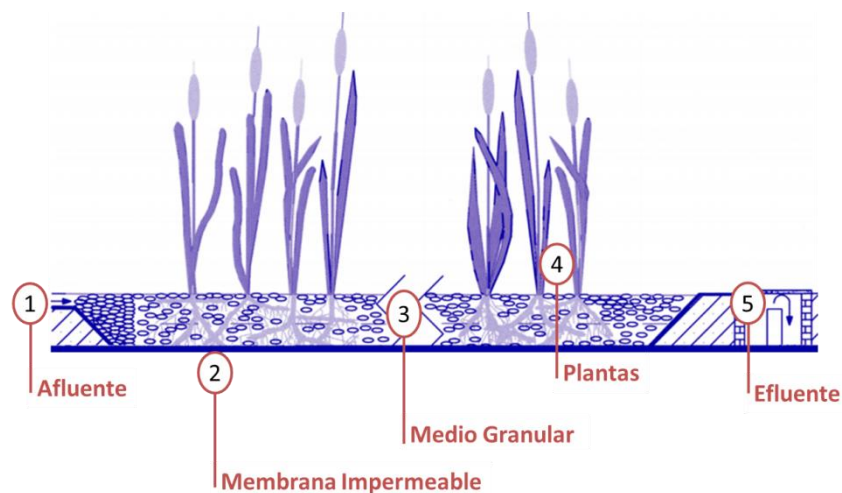
<sup>12</sup> ALEMANIA. AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DE ALEMANIA, GIZ. HOFFMANN, Heike *et al.* Programa de Saneamiento Sostenible ECOSAN. Revisión técnica de humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas. Traducido al español por Rotaria del Perú SAC. 2011

**4.1.2 Elementos que componen un Humedal.** Los HCFSSH consisten en una porción de terreno en forma de canal que debe estar impermeabilizada y en su interior contiene el agua residual, además se tiene una estructura de entrada, un medio granular, vegetación, microorganismos y una estructura de salida para el efluente.

Algunos de los materiales utilizados como sustrato de relleno son: grava, roca triturada y arena, la vegetación generalmente corresponde a plantas macrófitas emergentes. Debido a su diseño el nivel del agua en este tipo de humedal se mantiene por debajo de la superficie del medio.

El método común para lograr una distribución adecuada y una recolección uniforme del agua residual, es utilizar en las estructuras de entrada y descarga una tubería múltiple perforada.

Figura 1. Esquema de humedal de flujo subsuperficial horizontal



Fuente Adaptado de FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, Jesús. Humedales artificiales para depuración. En: Manual de Fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación. EDITA. p. 83.

**4.1.2.1 Agua Residual.** Es más que un solvente y está constituida por componentes físicos, químicos y biológicos, siendo una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos suspendidos o disueltos. La mayor parte de la materia orgánica presente en las aguas residuales consiste en residuos alimenticios, heces, material vegetal, y otros materiales orgánicos como jabones y detergentes.

Las aguas afluentes de los humedales construidos son de carácter residual y provienen del sistema de abastecimiento de agua después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y/o comunitarias. Se convierte en el elemento más importante de los humedales ya que está directamente relacionado con la hidrología y conecta todas las funciones del humedal.

**4.1.2.2 Impermeabilización.** Se realiza con el fin de evitar la posible contaminación de las aguas subterráneas por infiltración. Dependiendo de las condiciones del lugar será suficiente con la compactación adecuada del terreno de lo contrario se puede utilizar láminas sintéticas.

**4.1.2.3. Estructura de entrada y salida.** Las estructuras de entrada y salida tienen como objetivo la captación, separación y repartición del agua del humedal, es fundamental el uso de estructuras de entrada y salida apropiadas para asegurar la distribución y la recogida uniforme del agua residual que entra y sale del humedal.

Para la entrada normalmente se utiliza una tubería perforada que está ubicada en la parte superior del humedal en una zona de grava más gruesa que en el resto del humedal para permitir que el agua se introduzca más rápidamente hacia el interior del humedal y de forma uniforme.

Para la salida, normalmente se utilizan tuberías perforadas instaladas en el fondo del medio granular y rodeadas de grava similar a la utilizada en la entrada. Estas tuberías conducen el agua a vertederos de altura graduable que facilitan el control del nivel de agua dentro del humedal.

**4.1.2.4. Medio granular.** El medio granular sirve de soporte a la vegetación y permite la fijación de la biopelícula bacteriana que interviene en la mayoría de los procesos de eliminación de contaminantes presentes en las aguas residuales que se van a tratar, incluye suelo, arena, grava, roca, sedimentos y materiales orgánicos, estos se acumulan junto con los restos de vegetación debido a la baja velocidad del agua y a la alta productividad típica de estos sistemas.

El sustrato, sedimentos y los restos de vegetación en los humedales artificiales son importantes por varias razones<sup>13</sup>:

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas tienen lugar dentro del sustrato
- El sustrato proporciona almacenamiento a muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. la materia orgánica da lugar al intercambio de materia, la fijación de microorganismos, y es una fuente de carbono, que es la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal.

---

<sup>13</sup> Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba, Bolivia. 2010. ISBN 978-99954-766-2-5.

Una característica fundamental requerida para el medio granular es su resistencia al desgaste provocado por las aguas residuales, que debe garantizar que el material granular no se deteriore en el transcurso del tiempo. Para su elección es importante considerar la porosidad y granulometría, de la porosidad depende la superficie disponible para la formación de la capa bacteriana, ya que a más porosidad se reduce el área disponible, en cuanto a la granulometría, a mayor tamaño de la partícula, la capacidad hidráulica de la biopelícula aumenta, pero disminuye la eficiencia en la remoción de contaminantes, al tener menos área para el crecimiento bacteriano y al verse afectada por mecanismos como la adsorción, filtración y sedimentación.

**4.1.2.5 Plantas.** La acción de depurar las aguas residuales mediante el empleo de plantas se denomina fitodepuración, y es realizada por plantas acuáticas o macrófitas, que están adaptadas a medios muy húmedos o acuáticos. Las plantas de los humedales están adaptadas para crecer en un sedimento inundado donde realizan un transporte de oxígeno desde las hojas y los tallos hasta las raíces y rizomas.

Las porciones sumergidas de las hojas y tallos muertos se degradan y se convierten en restos de vegetación, que sirve como sustrato para el crecimiento de la biopelícula que es la responsable de gran parte del tratamiento que ocurre. Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual de varias maneras:

- Efectos físicos: distribuyen y ralentizan la circulación del agua y amortiguan los cambios de temperatura.
- Actúan como soporte para la biopelícula aumentando la superficie disponible para los microorganismos.
- Acumulan los nutrientes y liberan sustancias que favorecen la desnitrificación.

## **4.2 FENÓMENO DE COLMATACIÓN DE HUMEDALES**

Todos los tipos de humedales artificiales pierden su capacidad de tratamiento cuando se sobrecargan por periodos prolongados de tiempo, esto ocurre cuando los sólidos suspendidos, lodos o grasas pasan al medio granular del sistema.

“La colmatación puede ser considerada como un proceso obstructivo que involucra la acumulación de material dentro del espacio intersticial de un medio granular, reduciendo la permeabilidad y la conductividad hidráulica del medio”.<sup>14</sup> Esta obstrucción puede ser causada por procesos físicos, biológicos y químicos, asociados al medio granular y al fluido, denominándose así como colmatación física, química y biológica.

El material colmatante, generalmente consiste de sólidos en suspensión, películas bacterianas, polisacáridos y polímeros extracelulares generados por los microorganismos presentes, y algunos precipitados.

#### 4.2.1 Tipos de Colmatación

- **Colmatación Física:** hace referencia a las causas físicas responsables del fenómeno de colmatación como: el atrapamiento de partículas dentro de los poros de la grava producto de la filtración, la velocidad y dirección de las aguas tratadas producto de la pendiente del humedal.
- **Colmatación Biológica:** se presenta debido a la acumulación en los poros del medio granular de sólidos orgánicos, células y productos residuales microbianos que el HCFSSH no puede eliminar; desarrollando una biopelícula con capacidad adhesiva, atrapamiento de gases (p.e. dióxido de carbono, nitrógeno, metano, etc.), y acumulación microbiológica de precipitados insolubles.

---

<sup>14</sup> FLEMING, I.R.; ROWE, R.K. Y CULLIMORE, D.R. Field observations of clogging in a landfill leachate collection system. Canadian Geotechnical Journal. 1999. p. 687

- **Colmatación Química:** relacionada con la precipitación de minerales, es decir cuando un mineral disuelto en agua por procesos químicos se convierte en un sólido reduciendo la porosidad del medio.

**4.2.2 Análisis de colmatación en humedales.** Teniendo en cuenta que las posibilidades de proporcionar hábitat de vida silvestre y recreación pública son más limitadas que en el caso de los humedales de flujo libre, la meta de los investigadores en este campo ha sido mejorar las funciones de tratamiento de los HCFSSH a través de un diseño adecuado, que permita aumentar su vida útil manteniendo la eficiencia en la remoción de DBO, DQO, fósforo, nitrógeno y demás sustancias.

Para lograr dicha eficiencia, se persigue la optimización del proceso de depuración, partiendo del resultado de las investigaciones llevadas a cabo en las que se ha demostrado que los HCFSSH disminuyen su efectividad de depuración con el paso del tiempo, debido principalmente a la colmatación del medio granular.

Muchas técnicas utilizadas para el tratamiento de depuración del agua residual utilizan medios granulares (p.e. infiltración profunda, humedales construidos de flujo subsuperficial, etc.), basándose en el paso del fluido a través del medio poroso, de forma que todas aquellas partículas y contaminantes presentes en el fluido sufran procesos físicos, químicos y biológicos, para obtener un efluente apto para ser vertido al medio ambiente o para su reutilización.

Los medios porosos utilizados para la depuración de aguas residuales generalmente son gravas y arenas, con un valor de porosidad efectivo inicial, que debido a los procesos mencionados disminuye con el tiempo, llegando incluso al taponamiento total del espacio intergranular.

Los humedales construidos de flujo subsuperficial al estar constituidos por un medio granular presentan un alto riesgo de colmatación, cuyas principales causas son<sup>15</sup>:

- Existencia de pequeños poros del material granular (partículas finas no agregadas, alta desuniformidad).
- Acumulación de sólidos en suspensión dentro de los poros del medio granular.
- Crecimiento de una biopelícula en el medio.
- Bloqueo de los poros debido a un gel inorgánico resultante de la disolución del calcio en gravas limosas y su consecuente reacción con silicio presente en el agua residual.
- Peptización de coloides del suelo y colapso de los macroporos entre agregados.
- Precipitación y deposición del carbonato cálcico a bajos valores de pH.

Otras causas asociadas a la generación de este fenómeno son:

- La acumulación de fósforo, metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos y permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.<sup>16</sup>

Esto ocurre cuando el sistema de tratamiento primario falla y dicha acumulación pasa al lecho del humedal.

- Penetración de las raíces y rizomas de las macrófitas, lo que puede llegar a establecer caminos preferenciales para el agua con lo que se reduce el tiempo de retención y por lo tanto, la capacidad de depuración del filtro.

---

<sup>15</sup> SORIANO MORON, Carlos. Caracterización de la materia particulada de la línea de aguas residuales de un sistema de humedales construido. Tesis de Especialización. Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. 2009. p. 24.

<sup>16</sup> ESTADOS UNIDOS. EPA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales-Humedales de flujo subsuperficial. Washington, D.C. 2000. p.5.

Las anteriores causas están determinadas o afectadas por ciertos parámetros, entre los que se encuentran la carga de sólidos en suspensión, la carga orgánica y las estrategias de dosificación del agua residual, parámetros que se tienen en cuenta para el desarrollo del modelo que plantea esta investigación.

**4.2.3 Colmatación en Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal.** El artículo Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors<sup>17</sup> contiene la revisión bibliográfica de las publicaciones realizadas por diferentes investigadores a lo largo de dos décadas, dichos estudios se enfocan en los factores que ocurren y contribuyen a la generación del fenómeno de colmatación en el tratamiento de aguas residuales con humedales de flujo subsuperficial horizontal y vertical, para efectos de este trabajo se toma la información referente a los HCFSSH.

La colmatación es un proceso complejo que se produce por factores físicos, químicos y biológicos, los cuales se pueden diferenciar en dos grupos: generación intencional y no intencional, en la generación intencional están los sólidos orgánicos, inorgánicos y la precipitación química que ingresa al sistema, en la generación no intencional se ubica el crecimiento de la biomasa, crecimiento de la biopelícula, raíces y rizomas de las plantas, sólidos introducidos durante la construcción y sólidos producto de la erosión química de la grava. A continuación se presenta una descripción de dichos factores:

- Acumulación de sólidos: si el tamaño de las partículas que entran al humedal es mayor al tamaño de los poros del medio granular, puede ocurrir un atrapamiento afectando la conductividad hidráulica del HCFSSH, así mismo la acumulación de los sólidos en el tiempo disminuye el tamaño de los poros.

---

<sup>17</sup> KNOWLES, Paul *et al.* Clogging in subsurface-flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors. En: Ecological Engineering. Octubre, 2010. vol.37. p. 99-112

- Obstrucción por el biofilm: el principal factor que influye en la conductividad hidráulica del sistema es el biofilm, cuanto mayor sea la población de biopelícula menor será la conductividad hidráulica del humedal.
- Contribución de la vegetación: el crecimiento de las plantas disminuye el espacio intergranular debido al volumen que sus raíces ocupan en el medio granular, por otro lado una vez mueren las plantas, en esta zona se empieza a formar parte del lodo colmatante y si la tasa de degradación de la biomasa es menor que la tasa de generación de la muerte de raíces, estas se acumulan en el sistema.
- Efectos químicos: el tratamiento de procesos químicos, como la adsorción y la precipitación, también pueden contribuir a la colmatación; la adsorción hace referencia a la eliminación de metales y otros elementos químicos, se presentan problemas de colmatación cuando la capacidad del medio granular para eliminar estos elementos es menor a la necesaria y la precipitación química que ocurre dentro del humedal puede afectar las interacciones de la actividad biológica llevando a la colmatación del sistema.

#### **4.3 TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN RELACIONADOS**

Existen investigaciones en la comunidad científica en las cuales se utilizó la dinámica de sistemas para modelar diferentes fenómenos complejos en humedales construidos de flujo superficial y subsuperficial, a continuación se referencian dos investigaciones, en la primera se estudia la remoción de demanda biológica de oxígeno y en la segunda la remoción de nutrientes.

- A System dynamics Approach to Modelling the Degradation of Biochemical Oxygen Demand in a Constructed Wetland Receiving Stormwater Runoff.<sup>18</sup>

El objetivo de la investigación fue desarrollar una herramienta para ayudar a los gestores ambientales de la fuerza aérea norteamericana a identificar los parámetros de diseño de sistemas de humedales construidos para optimizar la degradación de demanda bioquímica de oxígeno durante el tratamiento de aguas de escorrentía de la fuerza aérea.

El modelo fue desarrollado utilizando el software para modelado STELLA II, y en él se representan las funciones hidrológicas entre un estanque de detención (encargado de recoger las aguas de escorrentía y aplicar un tratamiento primario) y un humedal horizontal de flujo libre, así como los procesos que ocurren dentro del humedal construido que afectan la degradación de la DBO. El modelo está segmentado en seis sectores titulados de la siguiente manera:

- Hidrología
- Parámetros físicos del humedal y cálculos relacionados
- Cálculo de tasas constantes de degradación.
- Concentración de la DBO en los compartimientos de la superficie del agua y del biofilm.
- Cálculos relevantes del flujo de la DBO.
- Cálculos relevantes del flujo del Biofilm

El modelo fue ejecutado para diferentes áreas superficiales, cada una con un rango de concentraciones de aguas de escorrentía tanto en el afluente como en el efluente, las gráficas obtenidas concluyen que existe una clara relación entre tiempo de retención hidráulico y tasas de carga orgánica versus la eficiencia en la remoción

---

<sup>18</sup> MUDGETT, Leslie A. A System dynamics Approach to Modelling the Degradation of Biochemical Oxygen Demand in a Constructed Wetland Receiving Stormwater Runoff. Master of Science in Engineering and Environmental Management. School of Engineering Air Force Institute of Technology.1995.

de contaminantes, además que grandes áreas superficiales, grandes relaciones largo ancho y grandes profundidades contribuyen a una menor concentración de DBO en la columna de agua.

- Modeling the system dynamics for nutrient removal in an innovative septic tank media filter.<sup>19</sup>

Utilizan el software STELLA para modelar la dinámica de la remoción de contaminantes de un innovador tanque séptico y medio de filtrado, con el propósito de aplicar análisis de sensibilidad para mejorar los futuros diseños de este sistema. El sistema fue utilizado para eliminar los contaminantes producidos por 15 personas en las viviendas del campo principal de la University of Central Florida (UCF), estas aguas residuales fueron bombeadas hacia un tanque séptico de una capacidad de 3.78 m<sup>3</sup> que funcionaba como tratamiento primario para luego pasar a un medio de filtrado que contiene tres zonas aeróbicas/anóxicas y una zona anaeróbica, el diagrama de flujo nivel construido se centra en la eliminación de nitrógeno, el cual pasa por las fases de amonificación, nitrificación y desnitrificación, las mediciones del contaminante en cada fase son tomadas del sistema real y representadas en el modelo construido.

El modelo construido representó con alta fidelidad el comportamiento del sistema real y permite simular el comportamiento de futuros sistemas siendo de gran utilidad para mantener las eficiencias probadas de la eliminación de nitrógeno en sus diferentes fases.

A continuación se relacionan dos investigaciones que tienen como propósito modelar y simular el crecimiento del biofilm y describir el funcionamiento de los HCFSSH pero utilizando otras técnicas diferentes a DS.

---

<sup>19</sup> ZHEMIN, Xuan; NI-BIN, Chang y MARTIN, Wenielieta. Modeling the system dynamics for nutrient removal in an innovative septic tank media filter. 2011

- BIO PORE, a mathematical model to simulate biofilm growth and water quality improvement in porous media: Application and calibration for constructed wetlands.<sup>20</sup>

Los autores utilizaron el software COMSOL Multiphysics para crear un modelo matemático que permitió simular el crecimiento del biofilm y mejorar la calidad del agua en el medio poroso, COMSOL Multiphysics requiere que se conozcan de antemano las ecuaciones diferenciales del modelo para luego utilizar el método de elementos finitos para resolverlas, el modelo BIO\_PORE cuenta con los siguientes sub-modelos: Hidráulico, Plantas, Transporte reactivo y Biofilm, los cuales se obtienen de revisión bibliográfica previa, la principal innovación del estudio, es el submodelo Biofilm, puesto que previene el crecimiento ilimitado e irrealista del Biofilm, en áreas con gran concentración de sustratos. Finalmente, el modelo es calibrado utilizando datos experimentales del periodo de un año obtenido de un HCFSSH piloto.

- The Cartridge Theory: A description of the functioning of horizontal subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment, based on modelling results<sup>21</sup>.

Se basan en los resultados obtenidos del modelo BIO\_PORE descrito anteriormente para proponer la “Teoría del Cartucho”, la cual dice que la colmatación en un HCFSSH es análoga al desgaste progresivo de un cartucho genérico de impresora, en donde la zona activa de bacterias está presente inicialmente cerca del afluente y gradualmente se va trasladando a la zona del efluente producto de la colmatación

---

<sup>20</sup> ROGER, Samsó y GARCÍA, Joan. BIO PORE, a mathematical model to simulate biofilm growth and water quality improvement in porous media: Application and calibration for constructed wetlands. En: Ecological Engineering. Febrero, 2013. vol.54. p.116-127.

<sup>21</sup> ROGER, Samsó y GARCÍA, Joan. The Cartridge Theory: A description of the functioning of horizontal subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment, based on modelling results. En: Science of the Total Environment. Enero, 2014. vol.473-474. p.651-658.

producida por la interacción entre las comunidades bacterianas y la acumulación de sólidos.

Esta teoría concuerda con lo que afirma Caselles Osorio “la oclusión de los espacios porosos dentro de la matriz granular de los HCFSSH ocurre frecuentemente en la zona de entrada, donde, el crecimiento de los sólidos en suspensión y la biopelícula es mayor acumulándose y atascándose los espacios intersticiales entre los agregados de la grava”<sup>22</sup>, es así como debido a los nutrientes y minerales que se concentran en esta zona del sistema, las raíces de las plantas y la biopelícula crecen más rápidamente.

El artículo inicia discutiendo unos cambios realizados al modelo biocinético implementado en BIO\_PORE, respecto a la dinámica del crecimiento de la población de bacterias soportado con resultados de simulación con un humedal piloto.

De acuerdo a la investigación, la vida útil de los HCFSSH llega a su fin cuando la comunidad de bacterias es empujada hacia el efluente y la biomasa ya no es suficiente para eliminar la cantidad de contaminantes deseada.

Los modelos existentes tienen varios grados de complejidad y se han desarrollado desde diferentes puntos de vista. En ellos se ha estudiado el proceso de colmatación sin involucrar aspectos como el desarrollo de la vegetación, el cual se tomó en cuenta en el presente trabajo.

---

<sup>22</sup> CASELLES OSORIO, Aracelly. Influence of the characteristics of organic matter on the efficiency of horizontal subsurface-flow constructed wetlands. Tesis doctoral. Cataluña. Universidad Politécnica de Cataluña. 2006. p. 15.

## 5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 5.1 DINÁMICA DE SISTEMAS

La dinámica de sistemas (DS) es un lenguaje que permite explicar y recrear los fenómenos de interés en términos de modelos. Estos modelos junto con el soporte computacional permiten observar cómo las relaciones (cambios o interacciones) en el seno de un fenómeno explican su comportamiento, el cual se puede analizar bajo diferentes condiciones (experimentación simulada).

El objetivo de la Dinámica de Sistemas es:

- Comprender las causas estructurales del comportamiento de un sistema
- Aumentar el conocimiento sobre los elementos del sistema y ver cómo las acciones sobre estos elementos determinan y modifican el comportamiento del mismo.

En el desarrollo de este proyecto se ha considerado la DS bajo el enfoque del Grupo de Investigación SIMON, es decir, “como un lenguaje que permite abordar el proceso de modelado como el ejercicio de construcción de una explicación científica”<sup>23</sup>, es así como se plantea elaborar los modelos con DS haciendo uso de los siguientes lenguajes: el primero es el lenguaje en prosa, donde se realiza una descripción verbal del sistema por medio del lenguaje natural. El segundo lenguaje es la representación o formulación del modelo por medio de un diagrama causal o de influencia, en el cual se identifican los elementos del sistema y las relaciones de influencia y realimentación entre estos. El tercer lenguaje corresponde a la representación del modelo en términos de flujos y niveles. Un cuarto lenguaje corresponde al lenguaje de las ecuaciones, las cuales surgen a partir del diagrama de flujo de nivel. Un último lenguaje, el del comportamiento, permite considerar los

---

<sup>23</sup> ANDRADE SOSA, Hugo H. *et al.* Diversidad en búsqueda de unidad: Capítulo 3. 2007.

resultados de la simulación haciendo uso de diversas herramientas, como lo son las gráficas y análisis de sensibilidad, entre otras. <sup>24</sup>

## **5.2 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES**

Trabajar con Dinámica de Sistemas involucra el uso de software especializado. Actualmente en el mercado existen herramientas computacionales que permiten apoyar el proceso de desarrollo y simulación de modelos de DS. “Las herramientas software para DS han posibilitado el uso y la difusión de la DS en diversos sectores como en la educación, investigación, la empresa, lo ambiental, lo social, entre otros”<sup>25</sup>.

Todos ellos ofrecen diferentes versiones comerciales, de desarrollo, educativas o gratuitas, y cada herramienta tiene características que la diferencian del resto, así como algunas permiten el manejo de vectores, otras permiten la interacción en el tiempo de simulación, análisis de sensibilidad, etc.

En la tabla 1 se relacionan las principales características de los software más importantes para trabajar DS.

---

<sup>24</sup>ANDRADE SOSA, Hugo Hernando *et al.* Evolución: herramienta software para modelado y simulación con Dinámica de Sistemas. Revista Dinámica de Sistemas. Vol. 5. p. 6.

<sup>25</sup> *Ibíd.*, p. 4

Tabla 1. Comparación de herramientas software para el modelado y simulación con DS

Software Versión revisada	Organización	Diagrama de influencias	Diagrama flujo nivel	Simulación	Herramientas de análisis
ANYLOGIC Versión: Professional Edition 6.5.0	XJ Technologies Company (Rusia)	No	Permite dibujar diagramas de flujo-nivel en el editor de diagramas gráficos, usando elementos como: -Nivel -Flujo -Variable auxiliar -Parámetro -Conector -Función tabla	Soporta las siguientes formas de presentación de resultados: -Diagramas de Gantt -Histograma -Estadísticas -Gráfico	Presenta varias herramientas de análisis como son: -Comparación de corridas Análisis de sensibilidad -Montecarlo -Calibración -Experimento de encargo
EVOLUCIÓN Versión: 4,0	Grupo SIMON de Investigación en Modelamiento y Simulación (Colombia)	Cuenta con un editor de Diagrama de Influencias. Tiene diferentes vistas y puede crear el diagrama con sus elementos, ciclos, clones, sectores y relaciones de material o de información entre ellos. Permite generar un bosquejo del Diagrama de Flujo Nivel.	Cuenta con un editor de Diagrama de Flujo Nivel. Presenta diferentes vistas y una barra de herramientas con los elementos que forman el diagrama de flujo nivel para crear el modelo de simulación.	Presenta los resultados de la simulación en forma de gráficos en 2D y 3D, de tablas y gráficos con animadores	Realiza el análisis de sensibilidad de dos formas: - Por variación de escenarios - Por variación de parámetros

Tabla 1 (Continuación)

Software Versión revisada	Organización	Diagrama de influencias	Diagrama flujo nivel	Simulación	Herramientas de análisis
Ithink Versión: 9.1.4 Stella Versión: 9.1.4	Isee systems (Estados Unidos)	Se pueden crear diagramas de influencias de dos tipos: - Diagramas de influencias híbridos - Diagramas de influencias regulares	Permiten elaborar modelos dinámicos que simulan sistemas experimentales con los elementos del diagrama de flujo-nivel como son: -Nivel -Flujos -Conectores -Conversores -Módulos	Permiten presentar los resultados a través de diferentes formas como tablas, gráficas, animaciones, películas Quick Time y archivos.	El análisis de sensibilidad revela puntos de apalancamiento claves y condiciones óptimas del modelo.
POWERSIM Versión: STUDIO 8	Powersim Software AS (Noruega)	Se pueden realizar, con etiquetas de textos y líneas pero que no se conectan entre sí (no es propiamente un modelo sino un dibujo)	Permite elaborar modelos con los elementos propios del Diagrama de flujo-nivel, incluye los elementos: -Nivel -Flujo continuo y discreto -Parámetro -Enlace -Variable auxiliar -Clon, Módulo -Depósito -Variables de vectores y otros elementos adicionales	Plasma la presentación de resultados de diversas formas: -Gráficas de tiempo -Tablas de tiempos -Gráficos -Gráficos de dispersión -Tabla -Indicador -Deslizador -Switch	Posee varias herramientas de análisis para estudiar y mejorar el comportamiento de la dinámica de los modelos creados con este software, estos son: -Análisis de riesgo -Control de escenarios -Optimización de política -Gestión de riesgos

Tabla 1 (Continuación)

Software Versión revisada	Organización	Diagrama de influencias	Diagrama flujo nivel	Simulación	Herramientas de análisis
SIMILE Versión: 5.7	Simulistics Ltd (Reino Unido)	No	Se pueden crear los elementos del diagrama flujo-nivel y las influencias entre ellos	Realiza la presentación de los resultados a través de gráficas, tablas o animaciones	No
VENSIM Versión: PLE 5.10a	Ventana System, Inc. (Estados Unidos)	Se pueden dibujar los elementos pertenecientes al Diagrama de Influencias en la ventana del editor, con sus respectivas variables, relaciones de influencia, bucles de realimentación y signos de polaridad (+ o -). Se pueden imprimir y exportar los esquemas al portapapeles para su uso en otras aplicaciones	Posee una zona de dibujo para crear el modelo con los elementos del Diagrama flujo-nivel, que pueden ser personalizados. La norma para esquemas Vesim es mostrar los niveles como una caja, con el nombre dentro de la misma. Los flujos se muestran con el nombre de la válvula de forma explícita, aunque a veces un flujo no tiene nombre. Las variables auxiliares, los parámetros, tablas, los datos variables (externos), etc., se muestran sólo con su nombre	Presenta los resultados de simulación en: -Gráficos Tablas Tablas de tiempo -Tira de causas	Presenta varias herramientas de análisis como son: -Diagramas de árbol de usos -Ciclos -Documento -Gráfico y tabla -Tira de causas -Comparación de simulaciones -Análisis de sensibilidad

Fuente Adaptado de ANDRADE, Sosa Hugo *et al*/2010. Evolución: herramienta software para modelado y simulación con Dinámica de Sistemas

## 6. DISEÑO METODOLOGICO

Las interacciones entre los factores que constituyen los HCFSSH no se han esclarecido completamente, y los modelos que se han desarrollado acerca de este tipo de sistemas han estudiado el fenómeno de colmatación desde el punto de vista de las entradas que recibe y las salidas que produce, es decir, modelos de caja negra, donde no se consideran las relaciones y las realimentaciones que suceden en su interior.

Es así como se considera necesario, estudiar la colmatación a través del modelamiento con el paradigma/lenguaje de la Dinámica de Sistemas, de manera tal que permita construir una representación de dicho fenómeno conducente a la identificación de los parámetros de diseño a través de soluciones derivadas del conocimiento profundo y estructural del fenómeno.

### 6.1 METODOLOGÍA DE DINÁMICA DE SISTEMAS<sup>26</sup>

El desarrollo del modelo dinámico-sistémico del fenómeno de colmatación en los HCFSSH, se realizó bajo la metodología del Grupo SIMON, profesor Hugo Andrade y co-escritores, la cual se explica a continuación:

- **Observar el fenómeno:** Al observar el fenómeno que se desea modelar y simular, se logra un entendimiento que se representa por medio de una imagen o modelo mental. Dicho modelo es susceptible a cambios, los cuales van conduciendo hacia su reformulación, en la búsqueda de un aprendizaje dirigido hacia la comprensión del fenómeno.

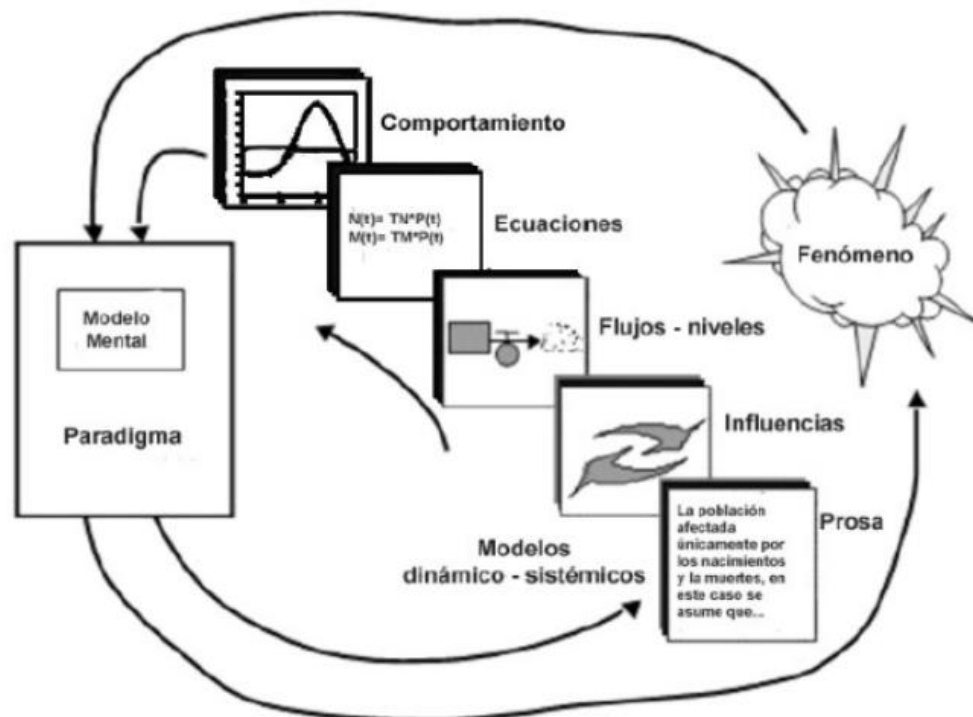
---

<sup>26</sup> ANDRADE, Sosa Hugo Hernando *et al.* Pensamiento Sistémico: Diversidad en búsqueda de Unidad. 2001. p. 235.

- **Lenguaje en prosa:** Es la redacción textual del fenómeno que se desea modelar, permite comunicar fácilmente las causalidades y cómo éstas condicionan el comportamiento de los modelos.
- **Lenguaje de Diagramas causales:** Tiene un carácter gráfico que contempla los elementos señalados en el lenguaje en prosa y permite apreciar los ciclos de realimentación, es decir la manera cómo interactúan mutuamente.
- **Lenguaje de los diagramas de niveles y flujos:** Una vez identificadas las influencias causales, se representan las características más pertinentes del fenómeno, vinculando a través de niveles y flujos el comportamiento percibido.
- **Lenguaje de ecuaciones:** En esta fase se representa la estructura causal como un sistema de ecuaciones diferenciales, con esta representación matemática y el uso de una herramienta informática especializada se obtiene el modelo que podrá simular posibles futuros en diferentes escenarios.
- **Lenguaje de los resultados simulados:** En esta fase se muestran las gráficas obtenidas después de realizar la simulación.

La metodología descrita anteriormente se puede observar en la siguiente figura, que muestra los diferentes tipos de lenguaje en que son escritos los modelos dinámico-sistémicos.

Figura 2. Modelado con Dinámica de Sistemas



Fuente ANDRADE, Sosa Hugo y co-escritores. Pensamiento Sistémico: Diversidad en Búsqueda de Unidad. 2001.

## 6.2 METODOLOGÍA DE DESARROLLO DEL MODELO

Para el desarrollo de este proyecto se descarta el software de tipo comercial, al revisar el software de código abierto se observa que no tienen una interfaz gráfica de usuario amigable, lo cual requeriría ingresar los datos por código. Por lo tanto, se elige la herramienta computacional Evolución 4.5.

**6.2.1 Herramienta Computacional.** Evolución 4,5 es un software creado como resultado de proyectos de pregrado, especialización y maestría, constituye una experiencia de Ingeniería de Software de alta complejidad, cuyo soporte se encuentra en el grupo de investigación de modelado y simulación SIMON de la

Universidad Industrial de Santander, para ofrecer a la comunidad nacional e internacional, un soporte para el modelado y la simulación de fenómenos, con Dinámica de Sistemas.

Evolución es un software que permite modelar y simular fenómenos complejos con DS, para su desarrollo se utilizan técnicas de Programación Orientadas a Objetos (POO), diseño basado en componentes, patrones de diseño y el Lenguaje Unificado de Modelado (UML).

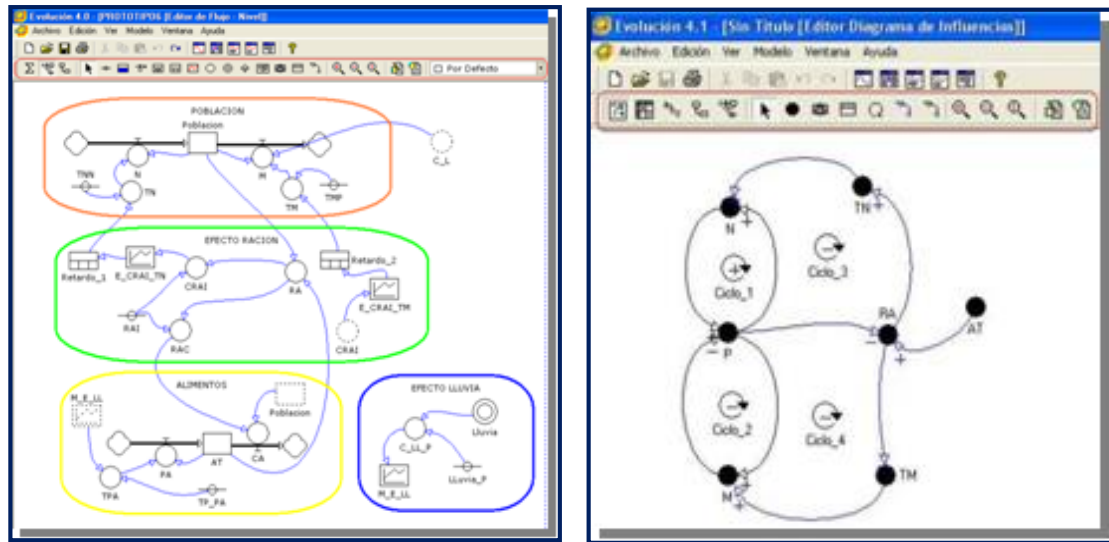
Evolución brinda la posibilidad de crear, editar y guardar Diagramas de Influencias, como parte de la documentación del modelo, considerando que constituyen un eslabón importante en el proceso de modelado con DS, debido a su carácter cualitativo y su énfasis en las estructuras cíclicas (realimentadas) que presentan las relaciones de influencia entre los elementos de un sistema.

También permite realizar el modelo de simulación por medio de un editor de Diagramas de Flujo-Nivel. El núcleo de Evolución es el Motor de simulación, este recibe el modelo introducido por medio del editor de flujo-nivel y resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales asociado, según las condiciones de simulación establecidas por el modelador; los resultados de la simulación se visualizan por medio de un Presentador de Resultados, utilizando diversos componentes y controles como: gráficas en dos y tres dimensiones, tablas, dial, barras de desplazamiento, etiquetas, etc para presentar el modelo en el lenguaje de comportamiento.<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup> ANDRADE SOSA, Hugo Hernando, *et al.* Evolución: herramienta software para modelado y simulación con Dinámica de Sistemas. Revista de Dinámica de Sistemas Vol. 5 Núm. 1 p.11

Figura 3. Diagrama de Flujo Nivel y Diagrama de Influencias

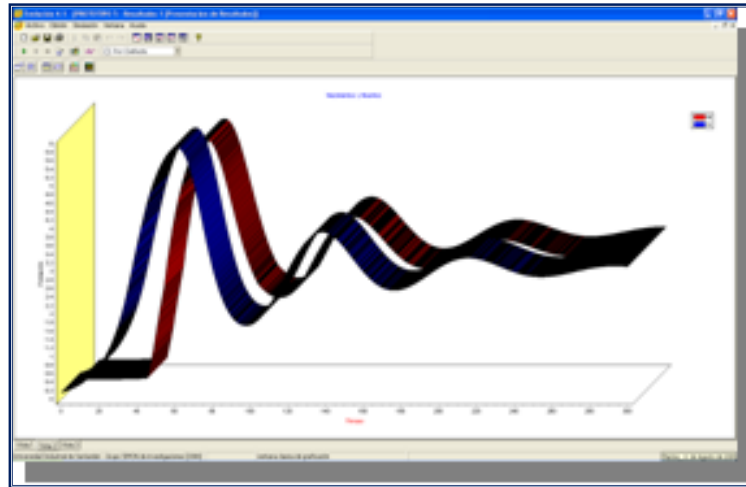


Fuente ANDRADE, Sosa Hugo Hernando *et al.* Evolución: Herramienta software para modelado y simulación con Dinámica de Sistemas. 2010

El análisis de resultados es un punto vital de su evaluación, es donde se puede concluir acerca del planteamiento del modelo, de aquí la importancia de realizar diferentes simulaciones teniendo en cuenta condiciones sobre las cuales el modelo tiene comportamientos específicos, así como analizar el aspecto cualitativo de las gráficas y las tendencias que se observan en las mismas.

Por otra parte, el análisis de sensibilidad es un aspecto del cual se estudia la dependencia de las conclusiones que se extraen del modelo con relación a posibles variaciones que sufran los valores de los parámetros del mismo. Evolución cuenta con herramientas que facilitan la realización de dos tipos de Análisis de Sensibilidad: por variación de escenarios y por variación de parámetros.

Figura 4. Simulación de Comportamiento



Fuente ANDRADE, Sosa Hugo Hernando *et al.* Evolución: Herramienta software para modelado y simulación con Dinámica de Sistemas. 2010

**6.2.2 Fases de Desarrollo.** Se utilizó modelamiento mediante Dinámica de Sistemas, para construir prototipos de complejidad y cobertura creciente de acuerdo a las siguientes fases de desarrollo:

- **Revisión bibliográfica:** Recopilación de información relevante al tema (tratamiento de aguas residuales domésticas, uso de HCFSSH, colmatación en medios granulares), en diferentes fuentes de información (Bases de datos especializadas, artículos científicos, documentos académicos, proyectos institucionales, trabajos de grado, libros, Internet, diferentes comunidades de dinámica de sistemas, etc.).
- **Análisis del Fenómeno:** Identificación de los factores que producen la colmatación del medio granular, asociados con los parámetros de diseño del sistema.

- **Construcción de prototipos:** Construcción progresiva de prototipos de complejidad y cobertura creciente del fenómeno en análisis mediante la metodología de DS.
  
- **Construcción del ambiente software:** Se construye una interfaz gráfica que le permite al usuario operar con mayor facilidad el modelo, aprovechando las ventajas que este ofrece. Se utiliza Delphi 7 para integrar el Software Evolución 4.5 con la interfaz gráfica
  
- **Análisis de Resultados:** Comparación entre los valores a escala real y los resultados obtenidos.

## **7. PROTOTIPO INICIAL**

El prototipo desarrollado inicialmente se enfocó en representar el comportamiento del fenómeno de colmatación, a través de la interacción de sus principales factores a saber, la acumulación de sólidos orgánicos e inorgánicos, el crecimiento de la biopelícula y el desarrollo de la raíz en las plantas adultas.

Como se mencionó anteriormente el proceso de modelamiento dinámico sistémico del fenómeno de colmatación en HCFSSH está dirigido por una metodología de desarrollo por prototipos de cobertura y complejidad creciente, que asume la DS como un lenguaje estructurado en términos de cinco lenguajes.

### **7.1 LENGUAJE EN PROSA**

Los humedales construidos se definen como sistemas de saneamiento diseñados para utilizar las funciones naturales de los humedales, la vegetación, los suelos y sus poblaciones microbianas como mecanismo de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, con el paso del tiempo su eficiencia en la remoción de contaminantes se ve influenciada por el fenómeno de la colmatación, considerado como un proceso obstructivo que involucra la acumulación de material dentro del medio granular.

Dicho material consiste en sólidos en suspensión, películas bacterianas, polisacáridos y polímeros extracelulares generados por los microorganismos presentes, y algunos precipitados. No obstante, la precipitación de minerales que es considerada la causa de la colmatación química no se tuvo en cuenta en el presente trabajo, el alcance de esta investigación se enfoca en el estudio de las causas que producen la colmatación de tipo físico y biológico.

Las causas de estos tipos de colmatación son: existencia de pequeños poros del material granular, acumulación de sólidos en suspensión, células y productos

residuales microbianos en los poros del medio granular desarrollando el crecimiento de la biopelícula en el medio y la penetración de raíces de plantas y rizomas. Las anteriores causas están determinadas o afectadas por ciertos parámetros, entre los que se encuentran la carga de sólidos en suspensión, la carga orgánica y las estrategias de dosificación del agua residual.

Los medios porosos utilizados para la depuración de aguas residuales generalmente son gravas y arenas, con un valor de porosidad efectivo inicial, que debido a los procesos mencionados disminuye con el tiempo, llegando incluso al taponamiento total del espacio intergranular.

## **7.2 LENGUAJE EN DIAGRAMA DE INFLUENCIAS**

La hipótesis del presente proceso de modelado se definió en términos de los ciclos de realimentación presentes en el fenómeno de colmatación, entendiendo que la colmatación de los HCFSSH se define como la obstrucción del lecho granular, reduciendo la conductividad hidráulica y la vida útil del mismo, esta se puede medir por el porcentaje de porosidad, se dice que cuando la porosidad es cero el humedal se encuentra totalmente colmatado.

En la figura 4, se representa la hipótesis dinámica básica del fenómeno utilizando el lenguaje de diagramas de influencias, la porosidad mide la colmatación del sistema, esta se expresa en porcentaje. Dependiendo de las características del humedal, especialmente el tipo de grava utilizada, inicialmente el humedal tiene una porosidad determinada, una vez el humedal entra en funcionamiento, y con el paso del tiempo diferentes factores influyen para que la porosidad vaya disminuyendo lentamente. Dicho factores son:

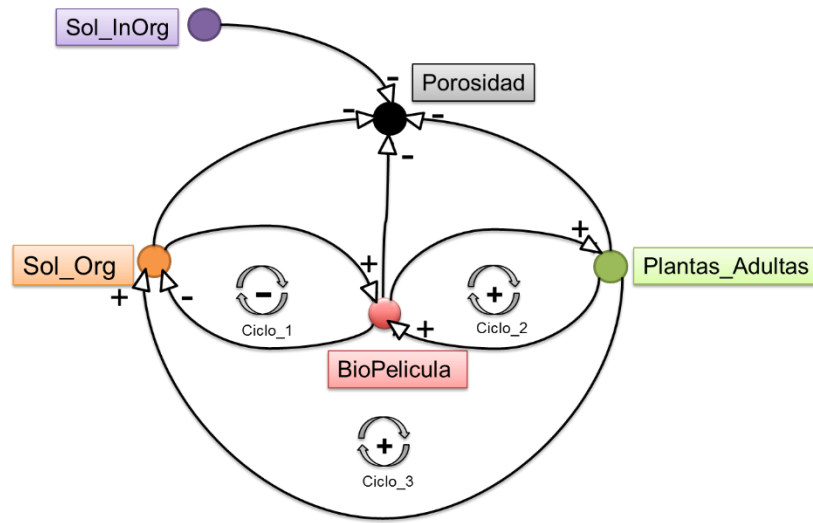
- Acumulación de sólidos inorgánicos
- Acumulación de sólidos orgánicos
- Crecimiento de la Biopelícula
- Crecimiento y muerte de las raíces de las plantas.

El ciclo de realimentación 1, es un ciclo de realimentación negativo el cual describe la dinámica de los sólidos orgánicos y la biopelícula, a mayor cantidad de sólidos orgánicos, mayor será la población de biopelícula en el sistema, dado que esta última se alimenta de los sólidos orgánicos, así mismo los sólidos orgánicos disminuyen porque son degradados por la biopelícula.

El ciclo de realimentación 2, es un ciclo de realimentación positivo, el cual describe la dinámica de la interacción raíces de las plantas con la biopelícula, en cuanto mayor sea la población de la biopelícula, mayor será el volumen total de las raíces de las plantas, dado que las raíces de las plantas absorben minerales y nutrientes transformados por la población de biopelícula, en sentido contrario a mayor volumen de las raíces de las plantas mayor población de biopelícula, dado que la biopelícula necesita adherirse a una superficie para vivir, esta superficie se la provee las raíces de las plantas y la grava del sistema.

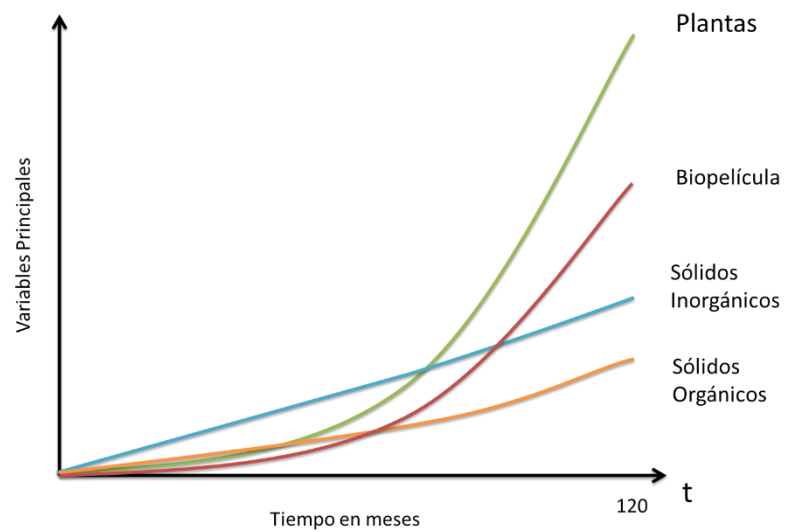
El ciclo de realimentación 3, es un ciclo de realimentación positivo, el cual describe la dinámica de la interacción entre las raíces de las plantas y los sólidos orgánicos, a mayor cantidad de raíces de las plantas, mayor será la cantidad de sólidos orgánicos, debido a que cuando las plantas son adultas y empiezan a morir, las raíces se convierten en sólidos orgánicos, el ciclo se cierra con las relaciones sólidos orgánicos a biopelícula y biopelícula a raíces de las plantas explicadas anteriormente en los ciclos de realimentación 1 y 2 respectivamente.

Figura 5. Hipótesis Dinámica Básica



En la siguiente figura se puede observar el Modo de Referencia, que representa el comportamiento dinámico de las principales variables que intervienen en el fenómeno de la colmatación.

Figura 6. Modo de Referencia



En la siguiente tabla, se encuentran identificadas las variables utilizadas en el diagrama de influencias (figura 5), en el cual se aprecia el comportamiento de referencia cualitativo de las principales variables identificadas en el fenómeno.

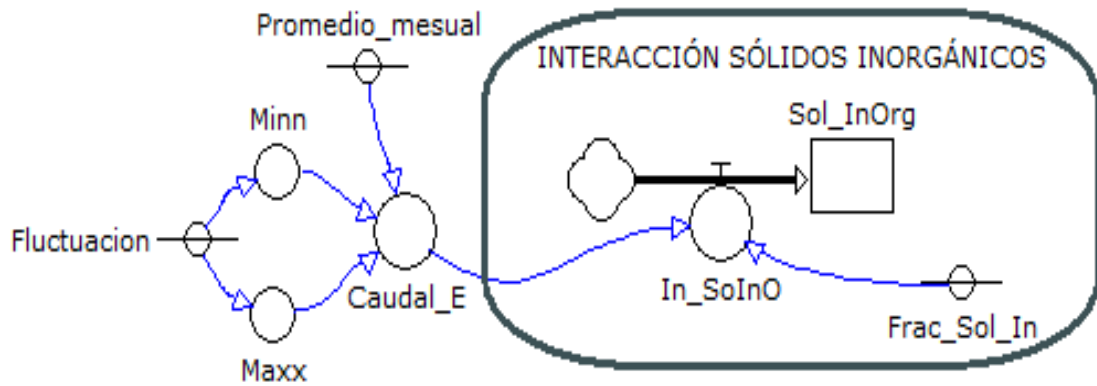
Tabla 2.Elementos diagrama de influencias

<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>
Porosidad	Mide el porcentaje de colmatación del humedal
Sol_Org	Solidos Orgánicos
Sol_InOrg	Solidos Inorgánicos
Plantas	Plantas
Biopelícula	Formada por comunidades de bacterias.

### **7.3 LENGUAJE EN DIAGRAMA DE FLUJOS Y NIVELES**

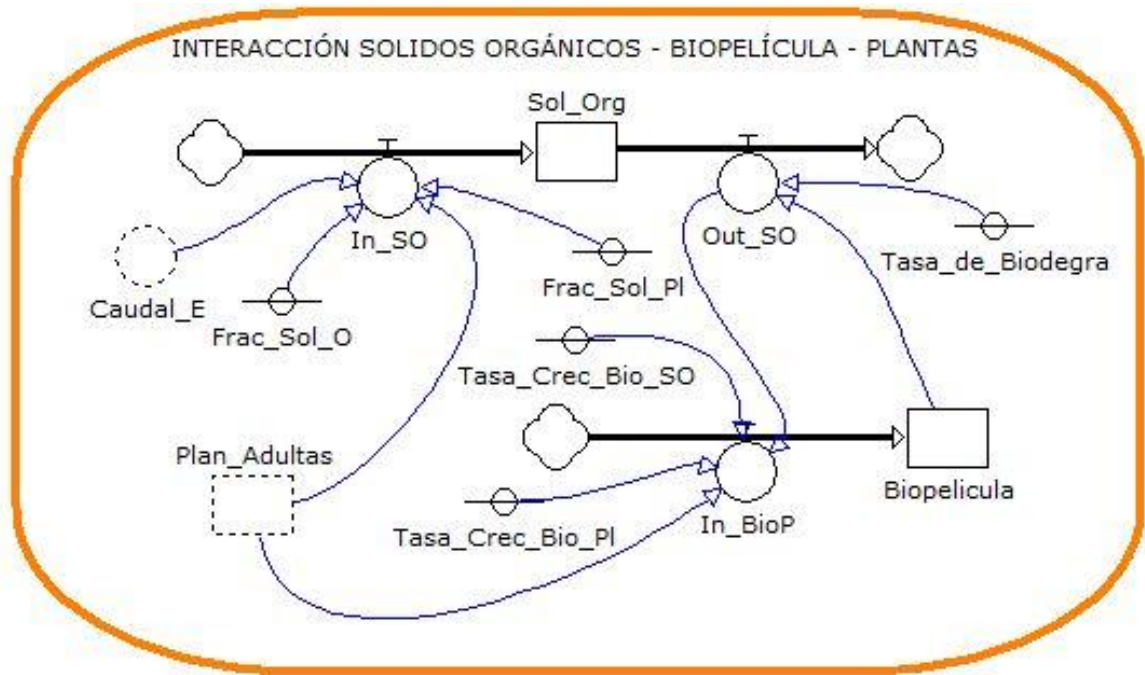
En el prototipo inicial se consideró la interacción de los elementos anteriormente mencionados, actuando de la siguiente manera: en el humedal ingresan aguas residuales de tipo doméstico, que contienen sólidos orgánicos e inorgánicos, estos últimos se van acumulando (figura 7), debido a que no son eliminados por el humedal, el caudal de entrada generalmente varía en el tiempo, en un día se pueden obtener diferentes caudales y de un mes a otro existen pequeñas fluctuaciones, por lo tanto se planteó parametrizar el caudal de entrada respecto a un promedio mensual.

Figura 7. Interacción Sólidos Inorgánicos



Por otra parte los sólidos orgánicos son alimento para la biopelícula, por lo que son absorbidos y degradados causando un aumento de la misma, por lo que a mayor cantidad de biopelícula mayor será la colmatación.

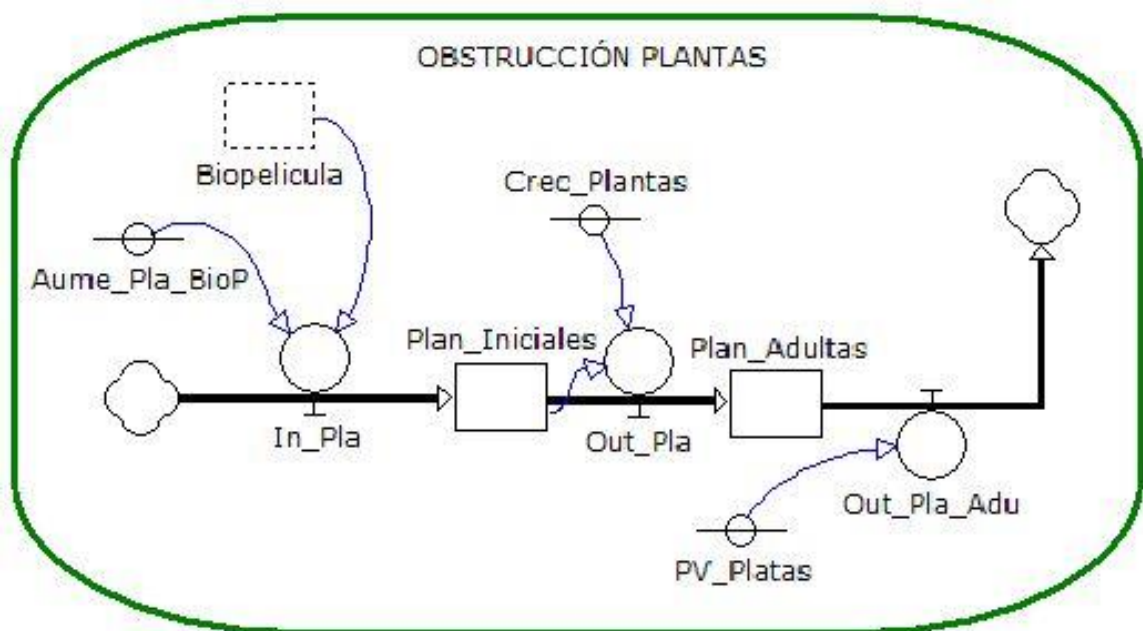
Figura 8. Interacción Sólidos Orgánicos, Biopelícula, Plantas Adultas



Las plantas adultas son otro factor que aumenta directamente la biopelícula, pues proporcionan el espacio para que la biopelícula se adhiera a sus raíces.

Dentro del funcionamiento de los humedales, las plantas juegan un papel muy importante (figura 9), pues son las encargadas de absorber los nutrientes de las aguas residuales, principalmente Nitrógeno, pero a la vez siendo un factor causante del proceso de colmatación, ya que la penetración de sus raíces y rizomas en el medio granular disminuyen la conductividad hidráulica del mismo.

Figura 9. Dinámica de las plantas

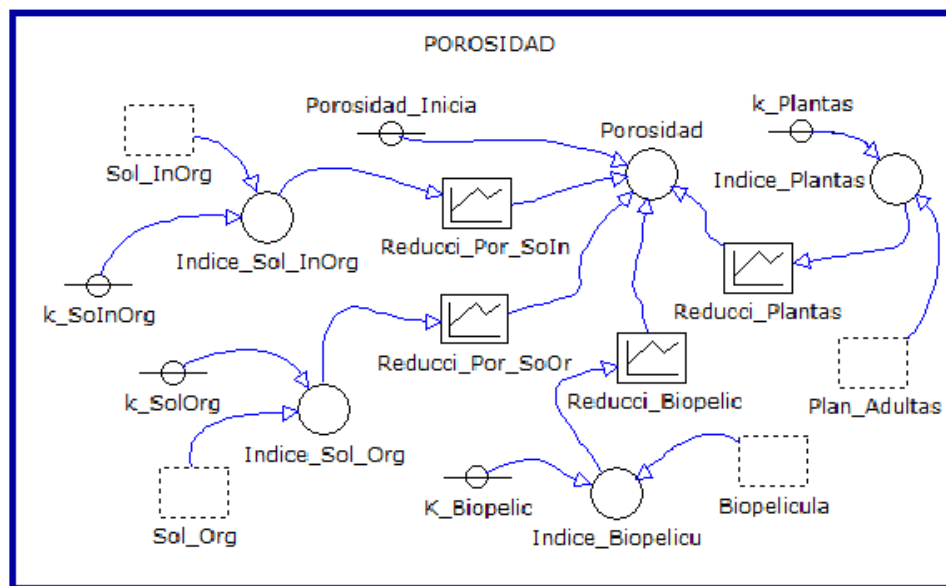


Las plantas absorben nutrientes transformados por la biopelícula, su impacto en la colmatación del sistema a temprana edad no es significativo, sin embargo, cuando las plantas son adultas presentan dos problemas: las raíces penetran el medio granular aumentando la colmatación y una vez mueren aumentan la cantidad de sólidos orgánicos.

El conjunto medio granular, biopelícula y 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 nutrientes, y la activación de los microorganismos patógenos, sin embargo, para que se produzca la colmatación deben pasar varios años a partir del comienzo de su funcionamiento, se establece que en el primer tercio del largo del humedal se produce colmatación a los 6 años.

Un HCFSSH en óptimas condiciones tiene una porosidad aproximadamente del 40%, en la figura 10, está representada la forma en la cual los sólidos orgánicos e inorgánicos, la biopelícula y las plantas disminuyen la porosidad del sistema. Este sector cuenta con varias linealidades, las cuales son consideradas una limitación en el modelo, evidenciando la necesidad de realizar un ajuste en los valores de las tablas del fenómeno (Reducci\_Por\_SoIn, Reducci\_Por\_SoOr, Reducci\_Biopelic, Reducci\_Plantas), basándose en el comportamiento cualitativo del mismo.

Figura 10. Dinámica de la porosidad



## 7.4 LENGUAJE DE ECUACIONES

El software Evolución internamente convierte el modelo construido en lenguaje de flujos y nieves a lenguaje de ecuaciones, estas ecuaciones matemáticas son posteriormente utilizadas para simular el comportamiento del modelo. En el anexo 1 se presentan el prototipo inicial en lenguaje de ecuaciones.

## 7.5 LENGUAJE DE COMPORTAMIENTOS

El siguiente escenario de simulación, está dado para obtener el modo de referencia, sin embargo, no se cuenta con datos reales del fenómeno, es un modelo teórico pero que servirá para estudiar el fenómeno.

**7.5.1 Escenario de Simulación.** A continuación se presenta el escenario base con el cual se describe el comportamiento del modo de referencia suministrado por el ingeniero civil experto en el fenómeno.

Tabla 3. Escenario modo de referencia

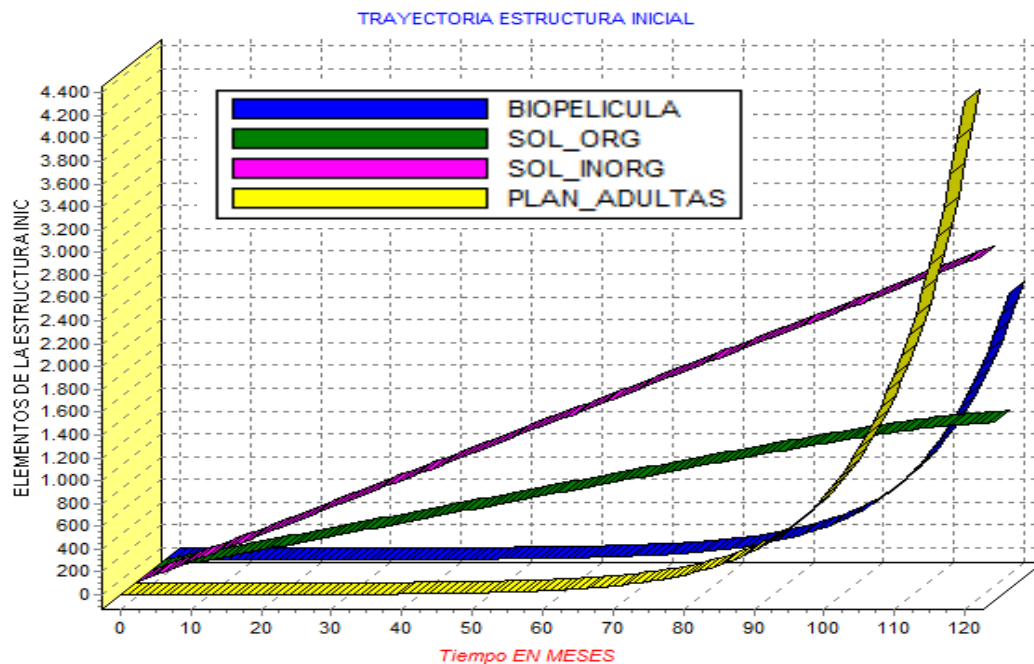
Elemento	Definición	Valor del elemento
Aume_Pla_BioP	Aumento de las plantas por efecto de la biopelícula	0.3 (1/mes)
Caudal_E	Caudal de entrada	108-132 (dm <sup>3</sup> /mes)
Crec_Plantas	Crecimiento de plantas	0.27 (1/mes)
Frac_Sol_O	Fracción de sólidos orgánicos	0.1 (1/mes)
Frac_Sol_In	Fracción de sólidos inorgánicos	0.2 (1/mes)
Frac_Sol_Pl	Fracción de sólidos orgánicos por efecto de las plantas	0.003 (1/mes)

Tabla 3. (Continuación)

Elemento	Definición	Valor del elemento
PV_Plantas	Vida promedio de plantas	0.05 (1/mes)
Tasa_Crec_Bio_PI	Tasa de crecimiento de la biopelícula por efecto de las plantas	0.045 (1/mes)
Tasa_de_Biodegr	Tasa de biodegradación	0.01 (1/mes)
Tasa_Crec_Bio_SO	Tasa de crecimiento de la biopelícula por efecto de los sólidos orgánicos	0.1 (1/mes)

Al simular el comportamiento bajo las condiciones anteriormente señaladas y tomando un tiempo de simulación de 120 meses, el cual representa la vida útil promedio de los HCFSSH, se obtiene la siguiente Figura.

Figura 11. Comportamiento de la estructura inicial



En la figura 11 se observa como las raíces de las plantas y la biopelícula tienen un comportamiento creciente casi exponencial durante los últimos meses de vida útil del sistema, a causa del ciclo de realimentación positivo que existe entre ambas variables, si la cantidad de biopelícula aumenta la cantidad de raíces también, debido a que la biopelícula le brinda nutrientes y alimento a las plantas, a su vez, si la cantidad de raíces de las plantas crecen la biopelícula aumenta, esto debido a que las raíces le proporcionan a la biopelícula un área para su crecimiento.

Los sólidos orgánicos inician creciendo gracias al siguiente ciclo de realimentación positivo: a mayor cantidad de sólidos orgánicos mayor cantidad de biopelícula, a mayor cantidad de biopelícula mayor será la cantidad de raíces y a mayor cantidad de raíces mayor cantidad de sólidos orgánicos, no obstante, con el tiempo y en la medida que la biopelícula crece, se va controlando los sólidos orgánicos debido a que estos son como alimento para la biopelícula. Por otro lado los sólidos inorgánicos se van acumulando en el sistema, por esa razón la gráfica tiene una tendencia creciente.

Una vez se obtienen los resultados del escenario simulado, se deduce que el comportamiento del sistema es coherente con el modo de referencia experimental investigado, sin embargo, al no contar con datos precisos para el estudio, se toma la libertad de utilizar datos aproximados basándose en el comportamiento cualitativo del fenómeno. Para que el humedal simulado se considere totalmente colmatado (con una porosidad de 0%), se debe presentar cualquiera o la combinación de las siguientes condiciones:

- Acumulación de sólidos inorgánicos equivalente a 5000 dm<sup>3</sup>.
- Acumulación de sólidos orgánicos equivalente a 5000 dm<sup>3</sup>.
- Crecimiento de la biopelícula equivalente a 5000 dm<sup>3</sup>.
- Crecimiento de la zona de raíces equivalente a 5000 dm<sup>3</sup>.

Como se puede observar en la siguiente figura, la porosidad del sistema tiende a disminuir gradualmente con el tiempo, por efecto de los factores ya mencionados (acumulación de sólidos orgánicos e inorgánicos, crecimiento de la biopelícula y de las raíces de las plantas).

Figura 12. Colmatación del humedal



No es propósito de este modelo considerar factores como: la calidad del agua, la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) en gran nivel de detalle, la Demanda Química de Oxígeno, la cantidad de nitrógeno u otros contaminantes en el agua. Sin embargo, se recomienda para futuros estudios considerar la interacción de la DBO en el sistema y la desadherencia de la biopelícula al material granular.

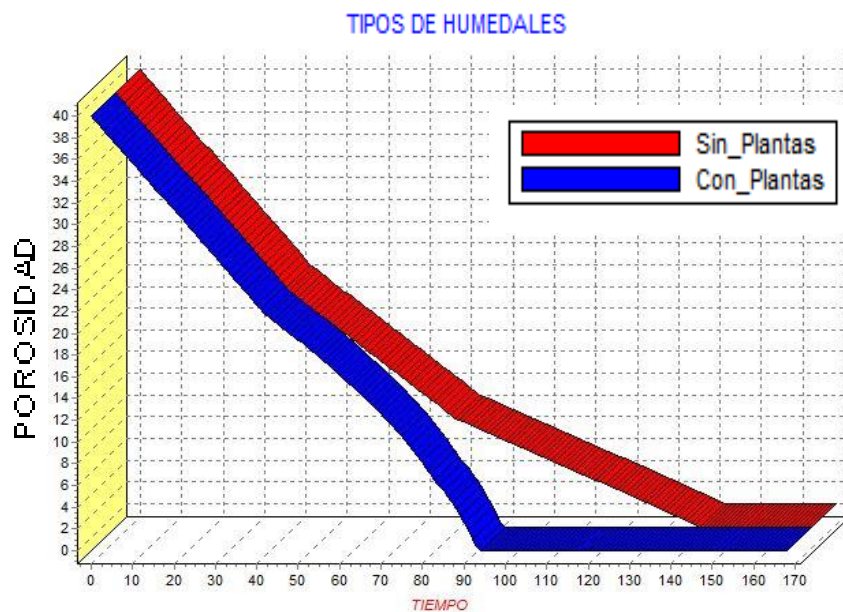
**7.5.2 Análisis de sensibilidad.** Los escenarios que se tomaron en cuenta para realizar el análisis de sensibilidad por variación de escenarios, fueron definidos de la siguiente manera:

- Escenario base que corresponde a los elementos definidos en la Tabla 3
- Escenario en donde se simula un humedal artificial sin plantas, esto se logra asignando al parámetro Crec\_Plantas un valor de cero (0). Dicho escenario se elige en consideración a la influencia que las plantas tienen en la

formación de la biopelícula y a la penetración de sus raíces en el medio granular del sistema.

Con estos dos escenarios se plantea comparar la vida útil del sistema a la vez que permita corroborar si el modelo representa el comportamiento de un sistema real.

Figura 13. Análisis de sensibilidad



Se puede observar que el humedal sin plantas tiene una vida útil mayor que el humedal con plantas, el humedal sin plantas se colmata en aproximadamente 13 años, mientras que el humedal con plantas se colmata en aproximadamente 8 años, debido a que las raíces de las plantas contribuyen en la acumulación de sólidos orgánicos, y en el crecimiento de la biopelícula (factores determinantes en la formación del fenómeno de colmatación).

**7.5.3 Aportes.** El primer prototipo del modelo, pretendía representar la dinámica básica del fenómeno de la colmatación en los HCFSSH a través, de la definición de la influencia de la acumulación de sólidos orgánicos e inorgánicos, el crecimiento de la biopelícula y la penetración de las raíces en el medio granular en el proceso del fenómeno.

En este nivel de desarrollo el modelo confirma las potencialidades de la DS para aportar a su comprensión. Sin embargo, dejó en evidencia la necesidad de ampliar los factores de diseño de los humedales que inicialmente se habían considerado.

A su vez el modelo representa gran utilidad académica, permitiendo al usuario:

1. Leer mediante un lenguaje gráfico de flujos y niveles, la forma como los elementos del sistema se integran con el modelo y explican el fenómeno de la colmatación.
2. Obtener rápidamente una descripción del funcionamiento interno de los HCFSSH.
3. Realizar experimentos y probar políticas en búsqueda de alternativas de mejoramiento.

## 8. PROTOTIPO FINAL

El prototipo final además de ser útil para estudiar y comprender el fenómeno de la colmatación, es un artefacto ingenieril que incorpora los factores de diseño, para que el usuario pueda considerar más criterios al momento de construir un HCFSSH.

### 8.1 LENGUAJE EN PROSA

**8.1.1 Fenómeno de la colmatación.** La colmatación de los HCFSSH se define como la obstrucción del lecho granular, reduce la conductividad hidráulica y la vida útil del humedal, puede ser medida por el nivel de porosidad del sistema, se dice que cuando la porosidad del sistema es cero, el humedal se encuentra totalmente colmatado y la vida útil de este llega a su fin.

La colmatación es un fenómeno complejo que involucra factores físicos, químicos y biológicos; los factores más influyentes en la colmatación son la acumulación de sólidos inorgánicos, sólidos orgánicos, el crecimiento de la biopelícula y la acumulación de raíces y rizomas en el medio granular.

**8.1.2 Funcionamiento de un HCFSSH.** Al humedal ingresa un caudal por el afluente, que contiene concentraciones de diferentes contaminantes, este caudal se distribuye por todo el sistema y lentamente recorre el conjunto formado por el medio granular, las plantas y la biopelícula, siendo este último el principal responsable de la depuración de contaminantes del caudal de entrada, una vez el agua residual atraviesa el humedal saldrá por el efluente, el cual tendrá una menor concentración de los contaminantes iniciales, esta concentración final dependerá del diseño del sistema.

El caudal de entrada puede tener dos tipos principales de contaminantes, sólidos orgánicos e inorgánicos. Los sólidos orgánicos son degradados por la biopelícula presente en el medio granular y las raíces de las plantas; la biopelícula necesita adherirse a una superficie viva o inerte, en este caso el medio granular y las plantas le proporcionan el espacio para vivir, mientras que los sólidos inorgánicos se van acumulando lentamente en el sistema, debido a que no son fácilmente degradables.

Las plantas juegan un papel esencial en el funcionamiento del humedal, estas en sus primeros meses de vida no impactan en gran medida la colmatación del sistema, no obstante, cuando crecen y sus raíces mueren contribuyen al desarrollo del fenómeno.

**8.1.3 Factores de diseño.** El libro “Depuración con Humedales Construidos”<sup>28</sup> ha sido tomado como referencia principal para la incorporación de los factores de diseño, ya que es una guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial que contiene el paso a paso del diseño de los HCFSSH.

En el Capítulo 6, los autores abordan el tema “Diseño de Humedales de Flujo Horizontal”, para el desarrollo de este modelo se utilizaron las fórmulas del mencionado capítulo, agregando después de cada explicación, el ejemplo final y mostrando la integración con el modelo construido en Evolución.

El dimensionamiento del sistema se divide en dos tipos, dimensionamiento biológico y dimensionamiento hidráulico, para hallar este último, es decir las dimensiones geométricas del sistema, longitud y ancho, es necesario primero determinar el dimensionamiento biológico.

---

<sup>28</sup> GARCÍA SERRANO, Joan y CORZO HERNÁNDEZ, Angélica. Depuración con Humedales Construidos: Guía práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. 2008.

**8.1.3.1 Dimensionamiento biológico:** el primer paso es hallar la superficie del humedal utilizando la siguiente fórmula:

**1) Hallar la superficie**

$$S = \frac{Q}{K_A} * \ln \frac{c_i}{c_o}$$

Donde,

**S** = Superficie del humedal [m<sup>2</sup>]

**Q** = Caudal promedio [ $\frac{m^3}{d}$ ]

**K<sub>A</sub>** = Constante cinética de primer orden, la cual varía según el contaminante que se quiera tratar [ $\frac{m}{d}$ ]

**C<sub>i</sub>** = Concentración inicial del contaminante, se determina con estudios de caracterización [ $\frac{mg}{l}$ ]

**C<sub>o</sub>** = Concentración final del contaminante, determina la calidad final del agua, se fija según el límite de calidad ambiental [ $\frac{mg}{l}$ ]

**Ejemplo:** Se tiene un caudal de entrada de 200 [ $\frac{m^3}{d}$ ], una concentración inicial del contaminante de 140 [ $\frac{mg}{l}$ ] y se desea que al final se tenga una concentración de 20 [ $\frac{mg}{l}$ ], se desea eliminar DBO por lo tanto el valor de K<sub>A</sub> es de 0.08 [ $\frac{m}{d}$ ].

$$S = \frac{200 (\frac{m^3}{d})}{0.08 (\frac{m}{d})} * \ln \frac{140 (\frac{mg}{l})}{20 (\frac{mg}{l})}$$

$$\mathbf{S = 4.864 \text{ m}^2}$$

La constante cinética **K<sub>A</sub>** tiene un valor dependiendo de lo que se quiera eliminar.

Tabla 4. Constante Cinética KA

Eliminar	Valor
DBO	0.08
Nitrógeno	0.025

Fuente GARCÍA SERRANO, Joan y CORZO HERNÁNDEZ, Angélica.

Si se dimensiona el sistema para eliminar DBO, también estará eliminando la materia en suspensión, ya que 0.08 m/d es suficiente para eliminar de manera eficiente la materia en suspensión. Esta misma configuración va a eliminar nitrógeno desde un 30% a 60%.

El segundo paso es verificar que la carga orgánica superficial del sistema sea menor a  $6 \left[ \frac{\text{g*DBO}}{\text{m}^2*\text{d}} \right]$ .

## 2) Verificar Carga Orgánica Superficial

$$C_s = \frac{Q * C_i}{S}$$

Donde,

**Cs** = Carga Orgánica Superficial [ $\frac{g*DBO}{m^2*d}$ ]

**Q** = Caudal promedio [ $\frac{m^3}{d}$ ]

**Ci** = Concentración inicial del contaminante, se determina con estudios de caracterización [ $\frac{mg}{l}$ ]

**S** = Superficie del humedal [ $m^2$ ]

**Ejemplo:**

$$C_s = \frac{200 \left( \frac{m^3}{d} \right) * 140 \left( \frac{mg}{l} \right)}{4.864 m^2}$$

$$C_s = 5,75 \left( \frac{g * DBO}{m^2 * d} \right).$$

Como la carga orgánica superficial es menor que 6 [ $\frac{g*DBO}{m^2*d}$ ] se puede continuar con los siguientes pasos de la guía práctica.

**8.1.3.2 Dimensionamiento Hidráulico:** una vez se halla el área superficial que va a tener el humedal y se corrobora que la carga orgánica sea menor que 6 ( $\frac{g*DBO}{m^2*d}$ ), se procede a determinar las dimensiones geométricas del sistema, iniciando por el Área Transversal.

### 3) Área Transversal

$$A_s = \frac{Q}{K_s * S}$$

Donde,

$A_s$  = Área transversal (sección del humedal perpendicular a la dirección del flujo) [ $m^2$ ]

$Q$  = Caudal promedio [ $\frac{m^3}{d}$ ]

$K_s$  = Conductividad hidráulica [ $\frac{m^3}{m^2 * d}$ ]

$s$  = Gradiente hidráulico, o pendiente [ $\frac{m}{m}$ ]

**Ejemplo:**

$$A_s = \frac{200 \left( \frac{m^3}{d} \right)}{3000/5 \left( \frac{m^3}{m^2 * d} \right) * 0,01 \left( \frac{m}{m} \right)}$$
$$A_s = 33,3 \text{ m}^2$$

El tipo de grava, tiene asociadas unas características de conductividad hidráulica y porosidad del medio granular. A continuación se presenta la relación de diferentes tipos de grava.

Tabla 5. Tipo de Gravas

Tipo de Grava	Porosidad (%)	Conductividad Hidráulica $K_s \left( \frac{m^3}{m^2 * d} \right)$
Arenas graduadas	28-32	100-1000
Arenas gravosas	30-35	500-5000
Gravas finas	35-38	1000-10000
Gravas medianas	36-40	10000-50000
Rocas pequeñas	38-45	50000-250000

Fuente GARCÍA SERRANO, Joan y CORZO HERNÁNDEZ, Angélica.

Esta información se representa en el modelo calculando los valores promedio de porosidad y la conductividad hidráulica, los cuales se relacionan a continuación:

Tabla 6. Porosidad y Conductividad Hidráulica Promedio para Modelado en Evolución

Tipo de Grava	Porosidad (%)	Conductividad Hidráulica $K_s \left( \frac{m^3}{m^2*d} \right)$
Arenas graduadas	30	550
Arenas gravosas	33	3000
Gravas finas	37	5500
Gravas medianas	38	30000
Rocas pequeñas	40	150000

Fuente Adaptado de GARCÍA SERRANO, Joan y CORZO HERNÁNDEZ, Angélica.

Para el escenario base se eligió como medio granular las arenas gravosas, con una conductividad hidráulica promedio de 3000  $\left[ \frac{m^3}{m^2*d} \right]$ , esta se divide por 5 como factor de seguridad.

#### 4) Ancho del humedal

$$W = \frac{A_s}{h}$$

Donde,

**W** = Ancho del sistema [m]

**h** = Profundidad del sistema [m]

**A<sub>s</sub>** = Area de la sección transversal [m<sup>2</sup>]

**Ejemplo:**

$$W = \frac{33,3 \text{ m}^2}{0,3 \text{ m}}$$

$$W = 111 m$$

“La profundidad del sistema es un factor que se debe elegir dependiendo del contaminante que se quiere priorizar en la eliminación, en este caso se elige 0,3 ya que es un valor óptimo para eliminar DBO”<sup>29</sup>.

Múltiples estudios han demostrado que la temperatura no influye en el momento de dimensionar el sistema para eliminar DBO, pero si influye al momento de eliminar Nitrógeno.

Tabla 7. Influencia de la temperatura en la eliminación de contaminantes

Eliminar	Temperatura
DBO	No influye
Nitrógeno	En invierno reduce en un 30% la eficiencia

Fuente Adaptado de GARCÍA SERRANO, Joan y CORZO HERNÁNDEZ, Angélica.

---

<sup>29</sup> GARCÍA SERRANO, Joan y CORZO HERNÁNDEZ, Angélica. Depuración con Humedales Construidos: Guía práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. Capítulo 6: Factores de Diseño. 2008. p.61.

### 5) Largo del humedal

$$L = \frac{S}{W}$$

Donde,

**L** = Largo del sistema [m]

**W** = Ancho del sistema [m]

**S** = Área Superficial del sistema [m<sup>2</sup>]

**Ejemplo:**

$$L = \frac{4.864 \text{ m}^2}{111 \text{ m}}$$

$$L = 44 \text{ m}$$

### 6) Relación largo por ancho

La relación largo por ancho (Largo/Ancho) de cada celda debe ser mayor o igual a 1, en caso contrario, es decir cuando el largo sea menor al ancho del sistema, este último se debe dividir en la cantidad de celdas que cumplan con este criterio.

$$\text{Relación Largo/Acho} = \frac{L}{W}$$

**Ejemplo:**

$$\text{Relación Largo/Acho} = \frac{44 \text{ m}}{111 \text{ m}}$$

$$\text{Relación } \frac{\text{Largo}}{\text{Acho}} = 0.3963$$

Como  $0.3963 < 1$ , entonces se divide el ancho entre 2, y se vuelve hacer el cálculo:

$$\frac{\text{Ancho}}{2} = \frac{111 \text{ m}}{2} = 55.5 \text{ m}$$

$$\text{Relación} \frac{44 \text{ m}}{55.5 \text{ m}} = 0.7927$$

Como  $0.7927 < 1$ , entonces se divide el ancho entre 3, y se vuelve hacer el cálculo:

$$\frac{\text{Ancho}}{3} = \frac{111 \text{ m}}{3} = 37 \text{ m}$$

$$\text{Relación} \frac{44 \text{ m}}{37 \text{ m}} = 1.189$$

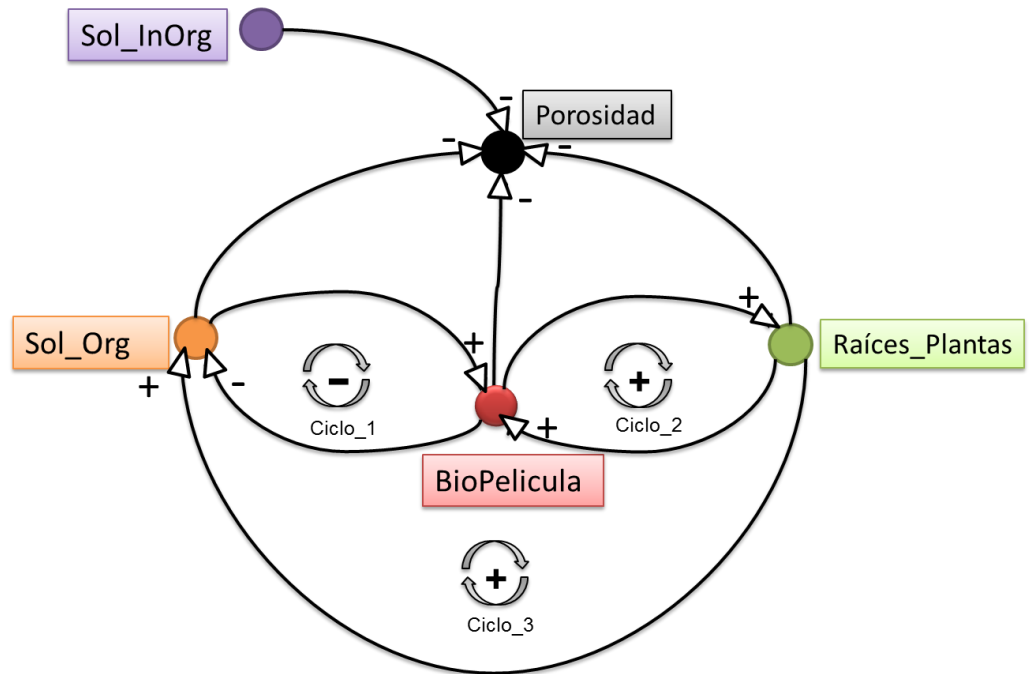
Finalmente  $1.189 > 1$ , entonces se deduce que el humedal tendrá 3 celdas.

De esta forma se obtienen el dimensionamiento biológico y el dimensionamiento hidráulico del sistema, se parte de los factores de diseño obtenidos en esta etapa, (largo, ancho, profundidad, concentración de sólidos orgánicos y concentración de sólidos inorgánicos) para modelar la colmatación y obtener la vida útil del sistema.

Se reitera que el nuevo escenario base, se construye con el ejemplo consignado en la Guía práctica de diseño y construcción de humedales construidos de los autores García y Corzo (2008), anteriormente descritos, si se desea tener en cuenta otros escenarios remitirse a trabajar directamente en el prototipo desarrollado en Evolución.

## 8.2 LENGUAJE EN DIAGRAMA DE INFLUENCIAS

Figura 14. Hipótesis Dinámica Básica

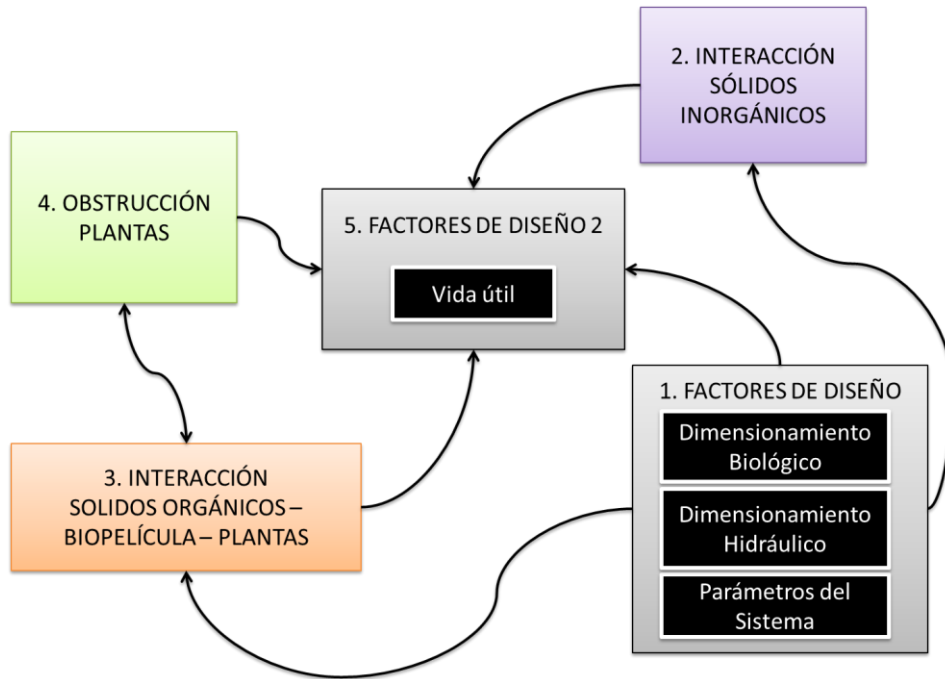


En la figura, se representa la hipótesis dinámica básica del fenómeno utilizando el lenguaje de diagramas de influencias, la interpretación es la misma que se expuso en el prototipo inicial.

## 8.3 LENGUAJE DE FLUJOS Y NIVELES

El modelo de diagramas de flujos y niveles de los HCFSSH expresa de manera funcional la hipótesis dinámica básica planteada. Con el fin de facilitar la comprensión de los diagramas de flujos y niveles, se ha segmentado el modelo en cinco sectores que agrupan los principales componentes de la dinámica básica del fenómeno. A continuación se ilustran dichos sectores.

Figura 15. Mapa de sectores

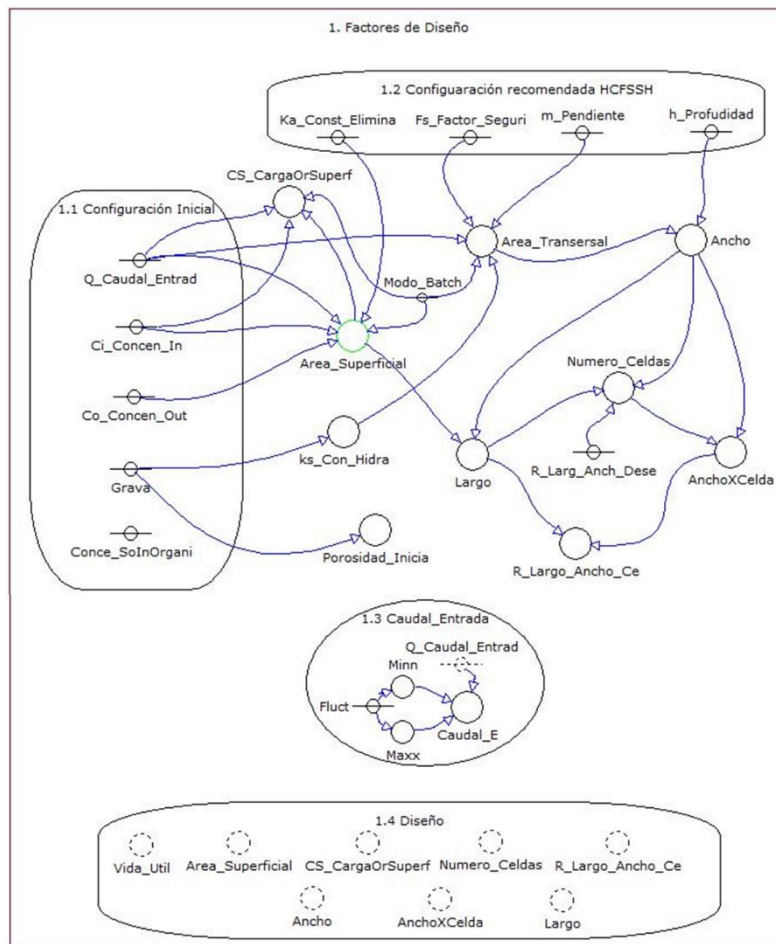


El sector uno, recibe los parámetros del humedal y calcula el dimensionamiento biológico y dimensionamiento hidráulico que debe tener, las dimensiones obtenidas del sistema son enviadas al sector cinco, mientras que el caudal de entrada al sistema es enviado a los sectores dos y tres. El sector dos además de recibir el caudal de entrada, recibe la concentración de sólidos inorgánicos para calcular el volumen de estos que se van acumulando en el sistema. El sector tres recibe la concentración de sólidos orgánicos, y la contribución de las raíces de las plantas en la dinámica del fenómeno, de esta manera calcula el volumen ocupado por los sólidos orgánicos y por la biopelícula. En el sector cuatro, se modela el crecimiento de las raíces de las plantas, este sector recibe del sector tres la contribución de nutrientes que le ofrece la biopelícula a las plantas. El último sector, el sector cinco obtiene de los sectores dos, tres y cuatro, el volumen que los sólidos orgánicos, inorgánicos, plantas y biopelícula ocupan en el sistema y de esta forma se obtiene la vida útil del mismo.

**8.3.1 Sector 1. Factores de Diseño** Contiene los parámetros principales a tener en cuenta en el momento de construir un HCFSSH, se calcula el dimensionamiento biológico y dimensionamiento hidráulico recomendado para que el humedal tenga un correcto funcionamiento. Este sector cuenta con cuatro subsectores:

- 1.1 Configuración Inicial
- 1.2 Configuración recomendada HCFSSH.
- 1.3 Caudal de Entrada
- 1.4 Diseño

Figura 16. Sector 1. Factores de diseño



**8.3.1.1 Subsector 1.1. Configuración Inicial.** Contiene los parámetros con los cuales el usuario básico interactúa a través de la interfaz gráfica, al modelo ingresa el caudal de entrada y la concentración inicial tanto de sólidos orgánicos como de sólidos inorgánicos, la concentración final del contaminante se calcula dependiendo del límite ambiental del país, en el caso de Colombia entró en vigencia la Resolución 0631 expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible el 17 de marzo de 2015 donde se estable 90 mg/L como el límite máximo de concentración de contaminante en el efluente<sup>30</sup>.

El usuario elegirá el tipo de grava que tendrá el humedal y los resultados de la simulación se obtendrán en función de los parámetros anteriormente ingresados.

**8.3.1.2 Subsector 1.2 Configuración recomendada HCFSSH.** Los parámetros de este subsector, no están disponibles al usuario básico dado que están configurados para obtener un óptimo desempeño, recomendados en García y Corzo (2008), este sector cuenta con el parámetro constante cinética de primer orden, factor de seguridad, pendiente de excavación y profundidad, sin embargo, el usuario experto si podrá realizar experimentos modificando estos parámetros según sus necesidades.

**8.3.1.3 Subsector 1.3 Caudal de Entrada.** Corresponde al caudal promedio diario.

**8.3.1.4 Subsector 1.4 Diseño.** Contiene las variables tipo clones de los factores de diseño obtenido, su objetivo es ofrecer una ayuda visual de parámetros que se desean conocer para construir un HCFSSH.

---

<sup>30</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 de 2015.

### **Parámetros de entrada al sistema (Subsector: 1.1 Configuración Inicial):**

- Caudal de Entrada
- Concentración Sólidos Inorgánicos Entrante
- Concentración Sólidos Orgánicos Entrante
- Concentración de Sólidos Orgánicos Final
- Tipo de Grava

### **Factores de diseño obtenidos (Subsector: 1.4 Diseño):**

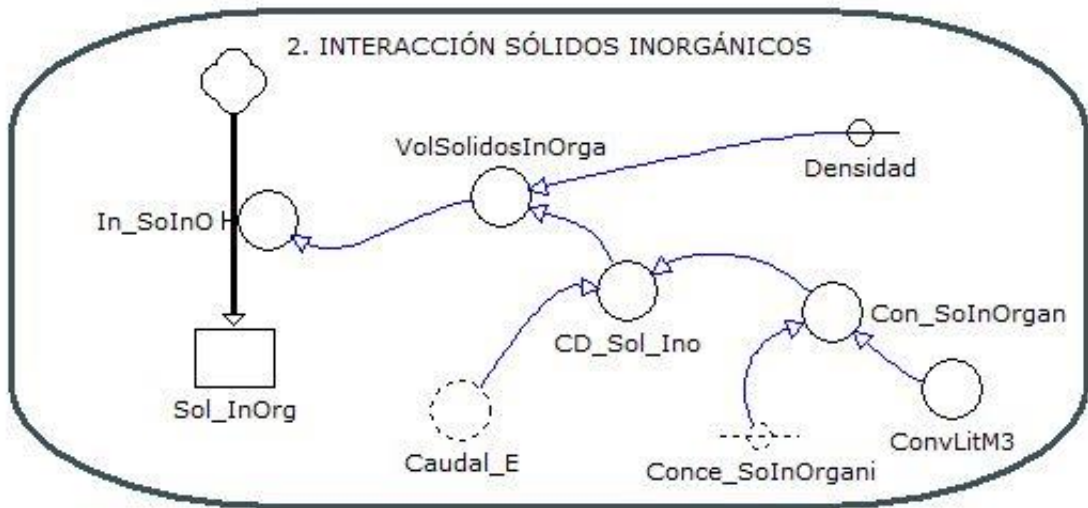
- Dimensionamiento Biológico
  - Área Superficial
  - Carga Orgánica Superficial
- Dimensionamiento Hidráulico
  - Numero de Celdas
  - Largo
  - Ancho
  - Ancho por celda
  - Relación Largo Ancho
- Vida útil del sistema.

El sector cuenta con un parámetro llamado "Modo\_Batch", y el único motivo por el cual está presente, es para simular un escenario de flujos de entrada discontinuos en donde se activa el caudal de entrada de forma intermitente, este escenario Modo\_Batch esta modelado para funcionar solo para el escenario base, pues cuando se activa, el Área Superficial, Carga Orgánica Superficial y Área Transversal mantienen el valor óptimo para el escenario base, en caso contrario, habría un error matemático ya que la entrada es cero. Es importante mencionar que en la práctica no se trabaja con este tipo de escenario, una de las razones es que en un sistema de tratamiento siempre hay caudal de entrada, poner en práctica este escenario

requiere tener otro HCFSSH para desviar el flujo de agua residual, se creó el escenario a modo de experimentación para estudiar el comportamiento del sistema.

**8.3.2 Sector 2. Interacción Sólidos Inorgánicos.** Representa la dinámica de la interacción de los sólidos inorgánicos.

Figura 17. Sector 2. Interacción Sólidos Inorgánicos

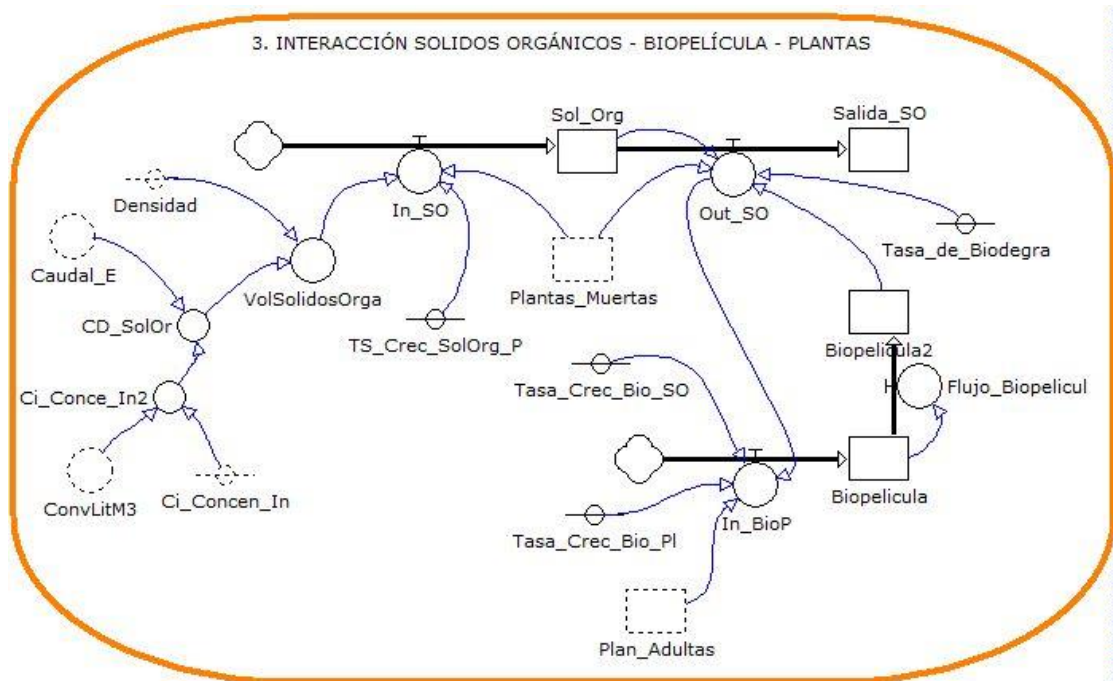


La concentración de los sólidos inorgánicos ingresa al sistema en mg/L (miligramos por litros), se realiza una conversión interna a  $\text{mg}/\text{m}^3$  para luego determinar la masa total de la carga inorgánica en el caudal de entrada, con la densidad de los sólidos se puede determinar el volumen que estos ocupan, los sólidos inorgánicos se van acumulado en el sistema, ya que no son fácilmente degradables. En el nivel solidos inorgánicos se acumula el volumen que ocupan los sólidos inorgánicos mes a mes.

### 8.3.3 Sector 3. Interacción Sólidos Orgánicos– Biopelícula– Plantas.

Representa la dinámica de la interacción del conjunto (sólidos orgánicos, biopelícula y plantas).

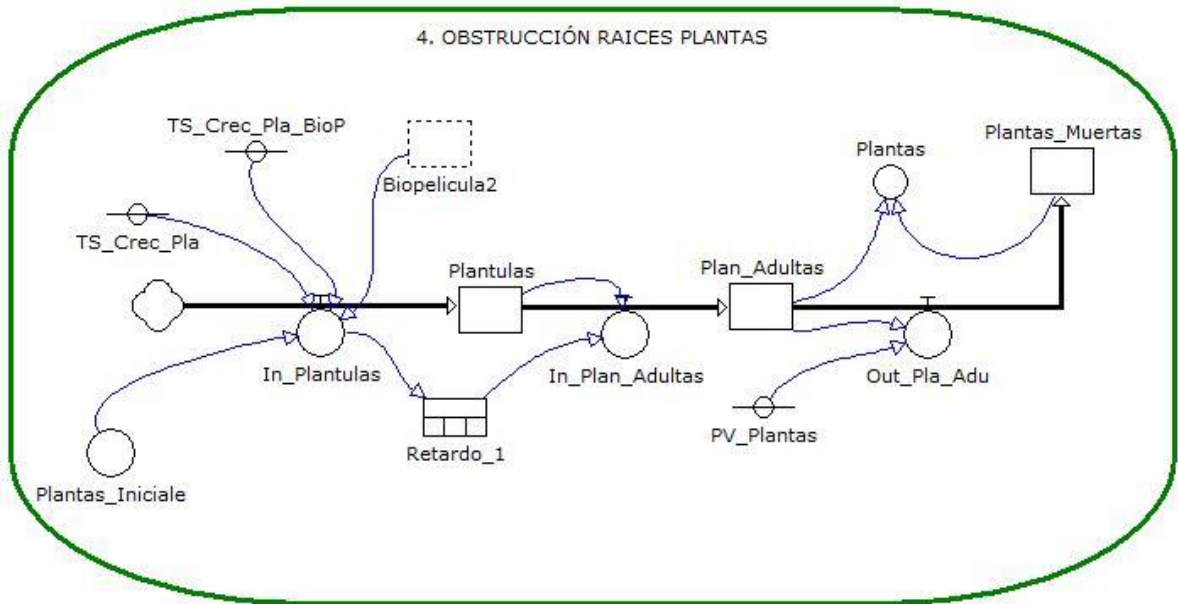
Figura 18. Sector 3. Interacción Sólidos Orgánicos– Biopelícula– Plantas



La dinámica de los sólidos orgánicos es similar a la de los sólidos inorgánicos, salvo que la degradación de estos por el humedal es significativa. Al igual que los sólidos inorgánicos, al humedal ingresa una concentración de sólidos orgánicos, las raíces de las plantas adultas también contribuyen a la generación de estos sólidos, pues cuando finaliza su ciclo de vida se convierten en sólidos orgánicos. Por otro lado, los sólidos orgánicos son degradados por la biopelícula, se dice que a mayor cantidad de biopelícula, mayor necesidad de alimento, por lo tanto menor cantidad de sólidos orgánicos. La biopelícula necesita de un espacio para vivir que es suministrado por las raíces de las plantas y el medio granular.

**8.3.4 Sector 4 Obstrucción plantas.** Representa la dinámica de crecimiento de las raíces de las plantas.

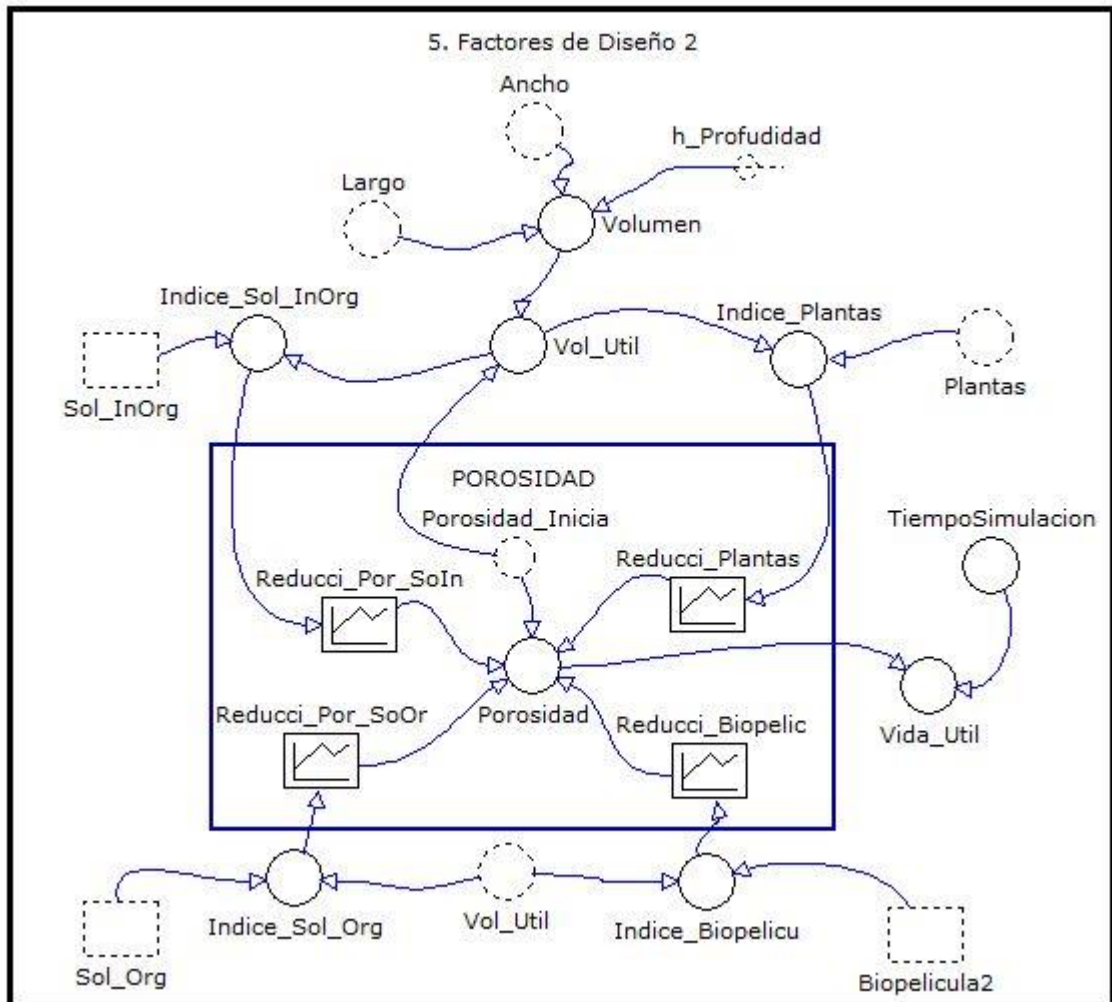
Figura 19. Sector 4. Obstrucción plantas



En este sector se modela el crecimiento de las plantas en el humedal, las cuales toman nutrientes transformados por la biopelícula, con el tiempo se convierten en plantas adultas, que suministran un espacio para que la biopelícula pueda vivir, al morir las raíces de las plantas se convierten en sólidos orgánicos, finalmente tanto las raíces de las plantas adultas como las raíces de las plantas muertas influyen en la dinámica del sistema.

**8.3.5 Sector 5 Factores de Diseño 2.** Calcula la reducción de la porosidad del sistema mes a mes, y obtiene la vida útil del mismo.

Figura 20. Sector 5. Factores de Diseño 2



El dimensionamiento hidráulico del HCFSSH, se obtiene del sector 1, con este resultado se calcula el volumen total del sistema, dependiendo de las características de la grava será el volumen útil del sistema, el cual se mide como una porosidad del mismo, el modelo calcula cómo el volumen de los sólidos orgánicos, inorgánicos, biopelícula y plantas van reduciendo el volumen útil, para modelar la reducción de esta porosidad se utilizan multiplicadores.

Cuando la porosidad del sistema llegue a 0% se dice que el humedal esta 100% colmatado y por lo tanto este no es apto para tratar aguas residuales, en este punto terminará la vida útil del sistema, que es el tiempo de simulación, este dato es presentado al usuario básico mediante la interfaz gráfica, y como apoyo al usuario experto se ubica un clon de esta variable en el subsector diseño.

#### **8.4 LENGUAJE DE ECUACIONES**

El software Evolución internamente convierte el modelo construido en lenguaje de flujos y niveles a lenguaje de ecuaciones, estas ecuaciones matemáticas son posteriormente utilizadas para simular el comportamiento del modelo.

En el anexo 2 se presentan el prototipo final en lenguaje de ecuaciones.

#### **8.5 LENGUAJE DE COMPORTAMIENTOS**

A continuación se presenta el escenario base con el cual se describe el comportamiento del modo de referencia suministrado por el ingeniero civil experto en el fenómeno.

El escenario base de la interfaz gráfica, parte del ejemplo al final del capítulo 6, de la guía práctica: “Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial” de García y Corzo (2008).

Tabla 8. Parámetros del escenario base

Parámetro	Valor
Caudal Entrada	200 ( $\frac{m^3}{día}$ )
Concentración Contaminante DBO afluente	140 ( $\frac{mg}{l}$ )
Concentración Contaminante DBO efluente	20 ( $\frac{mg}{l}$ )
Tipo de Grava	Arenas gravosas
Constante cinética de primer orden	0.08 ( $\frac{m}{d}$ )
Factor de seguridad	5
Pendiente	1%
Profundidad	0.3 m
Modo Batch	0
Densidad	1030.2 ( $\frac{kg}{m^3}$ )
Tasa de crecimiento de los sólidos Orgánicos por efecto de las plantas	0.01 ( $\frac{1}{mes}$ )
Tasa de Biodegradación	0.013 ( $\frac{1}{mes}$ )
Tasa de crecimiento de la biopelícula por efecto de los sólidos Orgánicos.	0.08 ( $\frac{1}{mes}$ )
Tasa de crecimiento de la biopelícula por efecto de las plantas adultas	0.05 ( $\frac{1}{mes}$ )
Tasa de crecimiento de las plántulas	0.005 ( $\frac{1}{mes}$ )
Tasa de aumento de las plantas por efecto de la biopelícula	0.09 ( $\frac{1}{mes}$ )
Tasa de muertes de las plantas	0.05 ( $\frac{1}{mes}$ )
Fluctuación Caudal de Entrada	0

Para el escenario anterior, se obtienen los siguientes resultados de simulación, junto con el comportamiento de la estructura (figura 21) y la dinámica de la porosidad (figura 22).

Tabla 9. Resultados de simulación escenario base

Dimensionamiento Biológico		Valor
Área Superficial		4867.77 m <sup>2</sup>
Carga Orgánica Superficial		140 ( $\frac{mg}{l}$ )
Dimensionamiento Hidráulico		Valor
Número de celdas		3
Largo		43.78 m
Ancho		111.11
Ancho por celda		37.04 m
Relación Largo/Ancho obtenida		1.18
<b>Vida útil</b>		<b>112 meses</b>

Figura 21. Comportamiento de la estructura escenario base

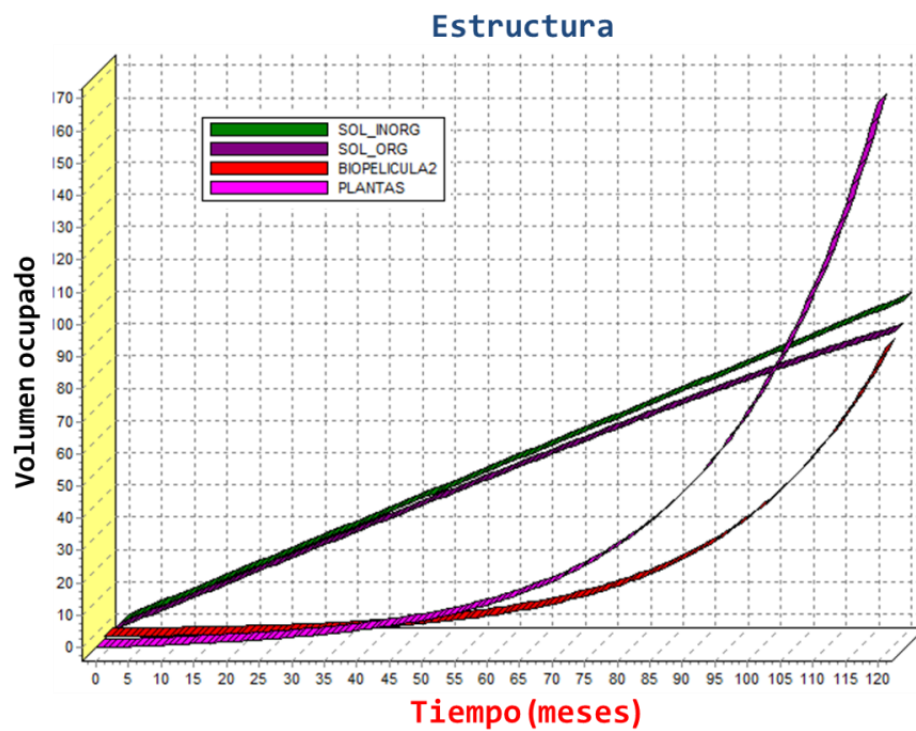
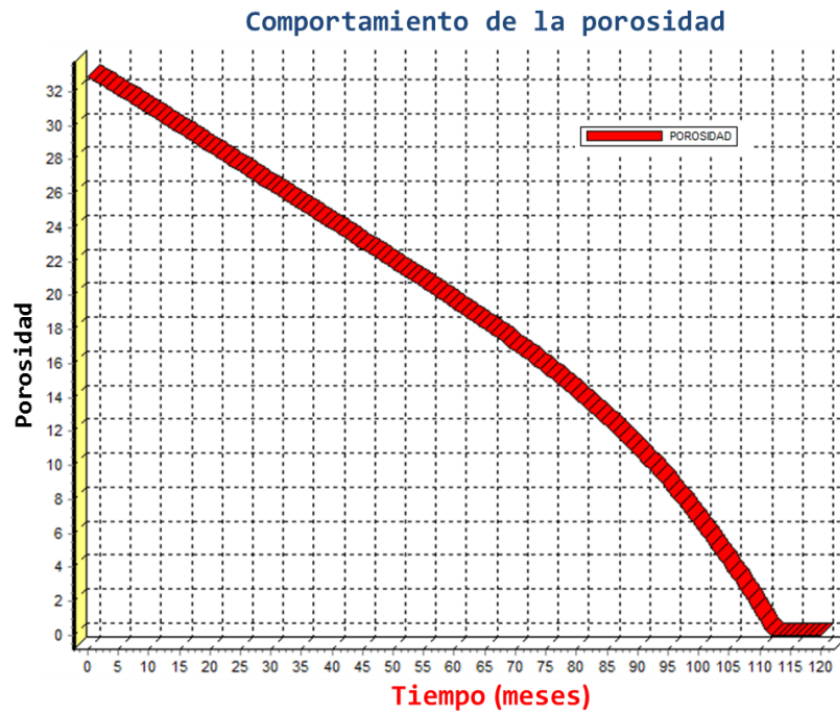


Figura 22. Comportamiento de la porosidad escenario base



## 9. PRUEBAS DE VALIDACIÓN DEL MODELO

Una etapa de suma importancia en la construcción de modelos, es el proceso de validación de los mismos, pues el modelado es un proceso a través del cual se logra la representación del modelo mental de una situación que percibe un observador, que se apoya en los conceptos de expertos, sin embargo, dichos conceptos en su gran mayoría no están fundamentados bajo teorías científicas, de aquí la importancia de comprobar el modelo a través de la validación.

Antes de iniciar el proceso de validación del modelo, es necesario realizar una verificación del mismo, que consiste en analizar la consistencia matemática del modelo, enseguida se procede con la validación que generalmente se realiza siguiendo el propósito por el cual fue construido dicho modelo, esto, teniendo en cuenta que un modelo se construye para un determinado propósito y necesariamente no resulta ser útil para un propósito diferente a aquel para el cual fue construido.

Existen diferentes métodos para evaluar un modelo, en este estudio, se utilizarán ocho (8) pruebas de evaluación, recomendadas por Sterman en su libro “Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World”<sup>31</sup>:

- Pruebas de suficiencia de los límites
- Pruebas para la evaluación de la estructura
- Pruebas de consistencia dimensional
- Pruebas de evaluación de parámetros
- Pruebas de condiciones extremas

---

<sup>31</sup> STERMAN J. D. (2000). Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. NY: McGraw-Hill Higher Education.

- Pruebas de error de integración
- Pruebas de comportamientos anómalos
- Análisis de sensibilidad

Además de estas pruebas, se tiene en cuenta el criterio de utilidad, criterio de confianza y documentación del modelo.

### 9.1 PRUEBAS DE SUFICIENCIA DE LOS LÍMITES

Las pruebas de suficiencia de los límites evalúan que tan adecuados son los límites del modelo para el propósito requerido, para este caso el propósito es estudiar la colmatación del sistema, característica que determina la vida útil del mismo, y que está ligada a los factores de diseño asociados a los HCFSSH, a continuación se presenta la tabla de límites del modelo en donde se diferencian los elementos endógenos de los elementos exógenos.

Tabla 10. Elementos Endógenos y Exógenos

Elemento	Endógeno	Exógeno
Ancho	X	
Área Superficial	X	
Carga Orgánica en afluente		X
Carga Orgánica en efluente		X
Carga Superficial	X	
Caudal Entrada		X
Constante Cinética de primer orden	X	
Largo	X	
Numero de Celdas	X	
Relación Largo/Ancho	X	
Tipo de Grava	X	
Carga de solidos Inorgánicos		X

En conclusión los elementos endógenos mostrados en la tabla anterior, son los que influyen en gran medida en la vida útil del humedal y en los factores de diseño asociados.

Los límites recomendados para el escenario base para un usuario inexperto, se encuentran en la tabla 11, estos límites se ajustaron en la interfaz de usuario de tal modo que el modelo sea fácil de operar.

Los HCFSSH están en la capacidad de depurar aguas residuales para comunidades de hasta 2000 habitantes, en promedio un habitante consume 104 litros de agua por día<sup>32</sup>, es decir que el consumo promedio para una población de 2000 habitantes es de 208.000 Litros / 208 m<sup>3</sup>.

La carga orgánica de sólidos orgánicos o sólidos inorgánicos se establece según estudios de caracterización del afluente.<sup>33</sup>

El parámetro de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) en el efluente deberá tener un valor máximo es 90 mg/L O<sub>2</sub>.<sup>34</sup>

Tabla 11. Límites parámetros exógenos

Elemento	Límite inferior	Límite Superior
Caudal Entrada ( $\frac{m^3}{d}$ )	20	208
Carga Orgánica afluente ( $\frac{mg}{l}$ ).	140	300
Carga Orgánica efluente ( $\frac{mg}{l}$ ).	10	90
Carga de Sólidos Inorgánicos ( $\frac{mg}{l}$ ).	140	300

<sup>32</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico. RAS Definición del nivel de complejidad y evaluación de la población, la dotación y la demanda de agua.

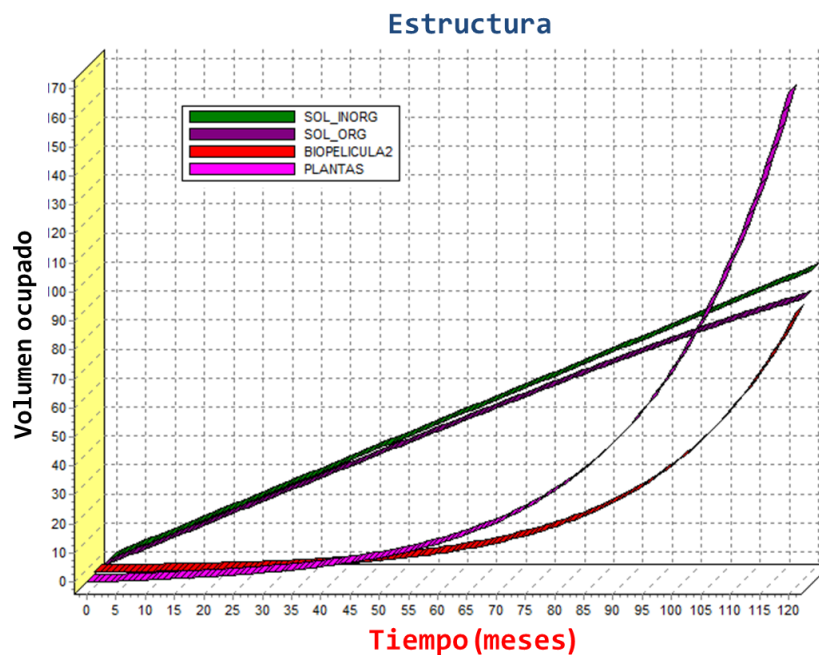
<sup>33</sup> GARCÍA Serrano, Joan y CORZO Hernández, Angélica. Depuración con Humedales Construidos: Guía práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. p.60.

<sup>34</sup> MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 de Marzo 17 de 2015.

## 9.2 PRUEBAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Las pruebas para la evaluación de la estructura indagan si el modelo es consistente con el conocimiento del sistema real relevante para el propósito requerido; en el modelo, se corrobora que los niveles del volumen de la biopelícula, sólidos orgánicos, sólidos inorgánicos, y raíces de las plantas adultas bajo ningún escenario sean menores que cero, para asegurar esta estructura en los flujos de salida de estos niveles se cuenta con un ciclo de realimentación negativo, que restringe los flujos de salida llevándolos a cero. Después de aplicar la prueba; se corrobora que el modelo es consistente con el conocimiento descriptivo relevante del sistema.

Figura 23. Estructura del sistema



En la figura 23 se puede observar que ningún nivel tendrá datos negativos, la prueba se realizó con un tiempo de simulación de 120 meses, además de esto, la estructura obtenida es acorde al modo de referencia del sistema real, suministrado por el experto.

### 9.3 PRUEBAS DE CONSISTENCIA DIMENSIONAL

Las ecuaciones matemáticas deben ser acordes con las leyes físicas, el primer paso para evaluar un modelo, es revisar que este tenga consistencia dimensional, además de esto, una buena práctica en modelado y simulación es especificar las unidades de cada elemento desde el inicio, en el Anexo 3 se presenta la descripción de cada elemento del modelo, ordenado por sectores de acuerdo a la siguiente información: tipo de elemento, nombre elemento, ecuación, unidades, descripción, referencia y límite de valores en caso de que aplique.

#### Ejemplo:

Nombre del sector
<b>Nombre:</b> Nom_Para (Nombre del Elemento).
<b>Tipo:</b> Tipo de elemento (Parámetro, Variable, Clon, Multiplicador, Retardo, Flujo, Nivel).
<b>Ecuación:</b> (Ecuación, contiene los elementos referenciados).
<b>Unidades:</b> m/d (Metros por día).
<b>Descripción:</b> Descripción del elemento.
<b>Referencia:</b> Referencia de los elementos, fuentes utilizadas.

En el documento referenciado se corrobora que todos los elementos del modelo son dimensionalmente consistentes.

#### **9.4. PRUEBAS DE EVALUACIÓN DE PARÁMETROS**

El propósito de esta prueba es determinar si son consistentes los parámetros con un conocimiento relativo suficiente del sistema real, al concluir la prueba se corrobora que los parámetros utilizados conllevan a una representación aproximada de la colmatación de los HCFSSH.

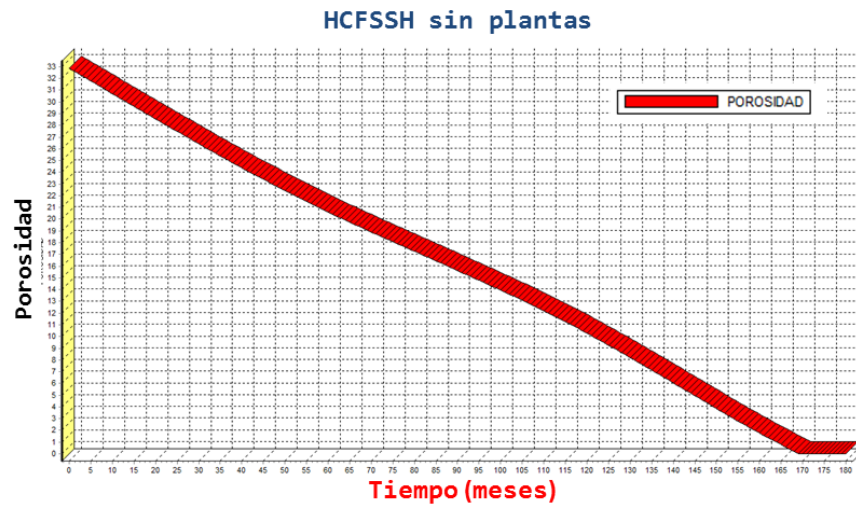
En el Anexo 3, documentación de los elementos del modelo, se referencia la estimación de los parámetros del modelo del escenario base, algunos de ellos son basados en juicios, partiendo del modelo de referencia suministrado por el ingeniero civil experto en el tema.

#### **9.5 CONDICIONES EXTREMAS**

Esta prueba puede determinar la robustez que tenga un modelo al someterlo a condiciones extremas, sin importar lo cerca que este el valor al límite de un parámetro o una política, el modelo debe continuar manteniendo su estructura bajo estas condiciones, al aplicar esta prueba se demuestra que el modelo es robusto y mantiene su estructura básica a pesar de realizar simulaciones con valores extremos.

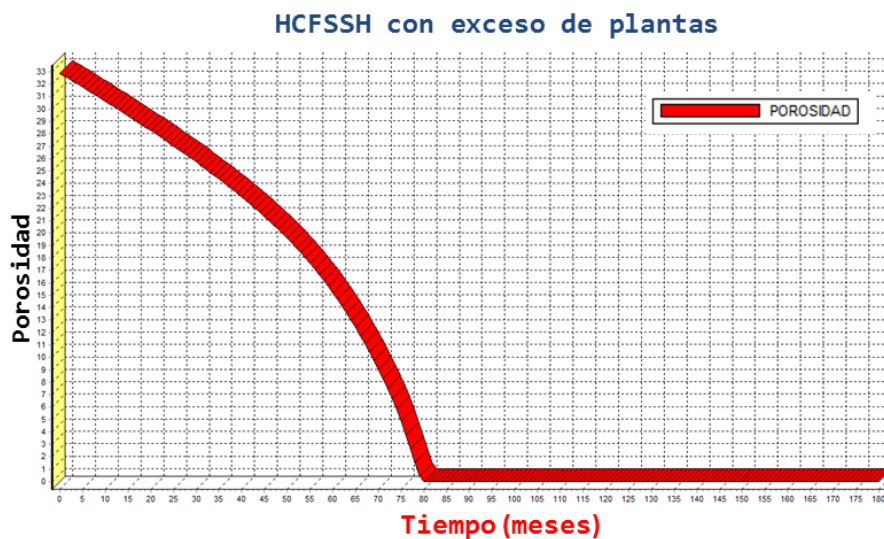
Un humedal sin plantas se comporta diferente a un humedal con plantas, para esta prueba se asigna un valor de 0 a la tasa de crecimiento de las plantas, se simula y se comprueba que efectivamente la vida útil de un HCFSSH sin plantas es mayor que un HCFSSH con plantas. Para el escenario base, un humedal sin plantas se obtiene una vida útil de 169 meses, es decir que tiene una diferencia de 57 meses respecto al mismo escenario pero con crecimiento de plantas.

Figura 24. Comportamiento de la porosidad en un HCFSSH sin plantas



Al realizar la simulación en el mismo escenario base pero ahora con el otro extremo en donde un humedal contiene el doble del crecimiento de las plantas, se obtiene una vida útil de 80 meses, siendo esto coherente con el sistema real.

Figura 25. Comportamiento de la porosidad en un HCFSSH con exceso de plantas



## 9.6. PRUEBA ERROR DE INTEGRACIÓN

Los resultados de simulación no deben ser sensibles al paso del tiempo o al error de integración, debe mantener su estructura, a continuación se realizan simulaciones utilizando diferentes errores de integración y dos métodos de integración, Método de Euler y Método de Runge Kutta, para el escenario base se observa que el comportamiento de la estructura y el valor de la vida útil del sistema se mantiene igual.

Tabla 12. Errores de integración. Método de Euler

Número de Simulación	Paso de integración	Vida útil del sistema	Método de integración
1	1	112 meses	Euler
2	0.7	112 meses	Euler
3	0.5	111 meses	Euler
4	0.25	111 meses	Euler

Tabla 13. Comportamiento del sistema con diferentes pasos de integración. Método de Euler

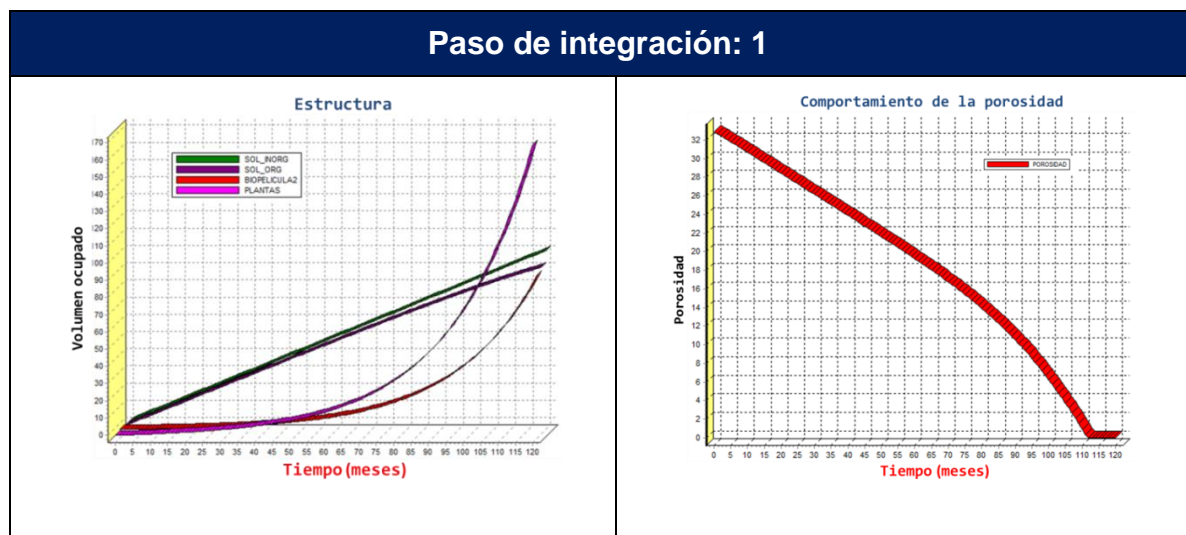


Tabla 13. (Continuación)

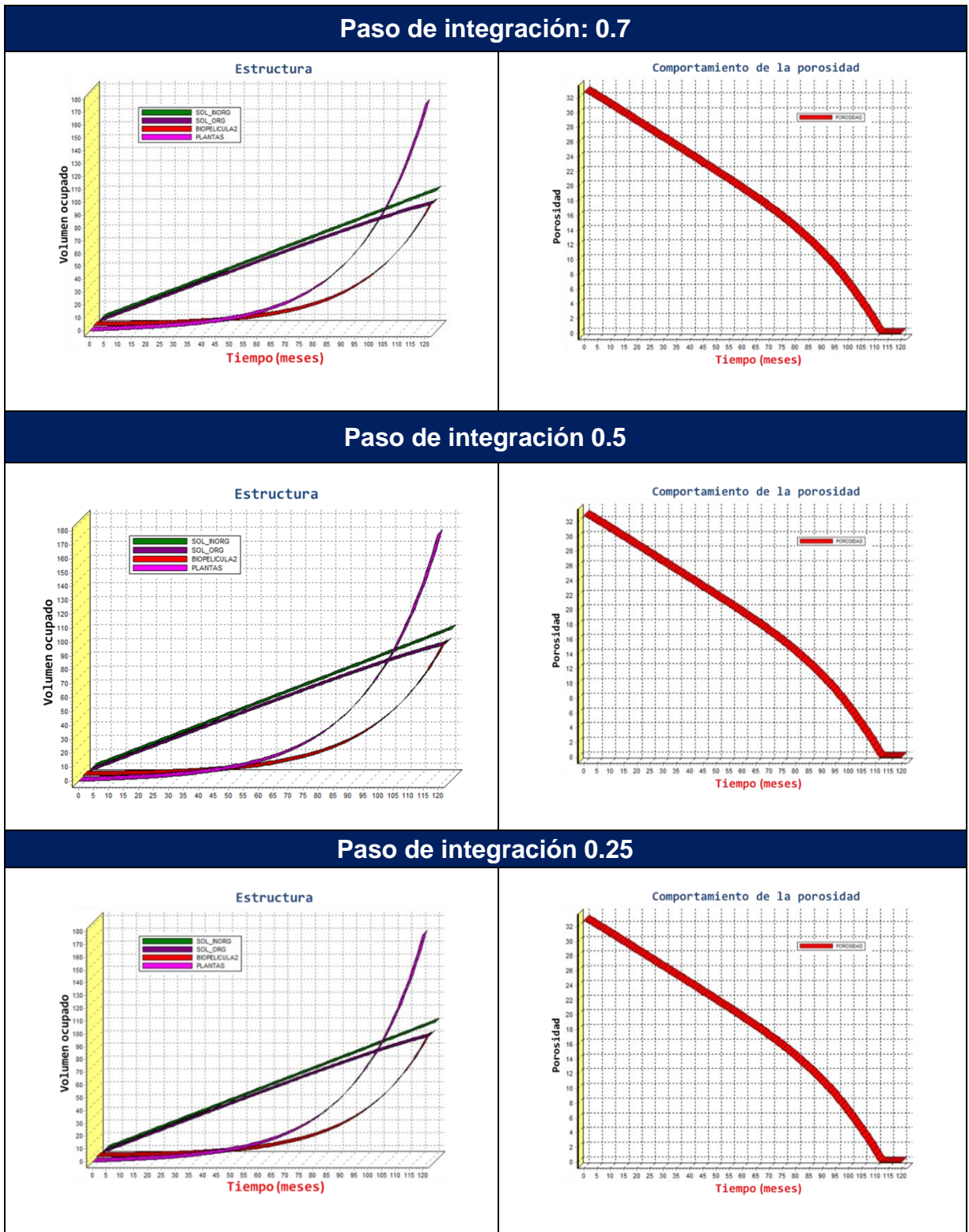


Tabla 14. Errores de integración. Método de Runge Kutta

Número de Simulación	Paso de integración	Vida útil del sistema	Método de integración
1	1	112 meses	Runge Kutta
2	0.75	112 meses	Runge Kutta
3	0.5	111 meses	Runge Kutta
4	0.25	111 meses	Runge Kutta

Utilizando el método de integración Runge Kutta, para pasos de integración de 1 y 0.75 se obtuvo una vida útil de 112 meses, mientras que para los pasos de integración 0.5 y 0.25 la vida útil del sistema fue de 111 meses. La diferencia entre estos resultados es consecuencia del error de aproximación del método utilizado.

Tabla 15. Comportamiento del sistema con diferentes pasos de integración. Método de Runge Kutta

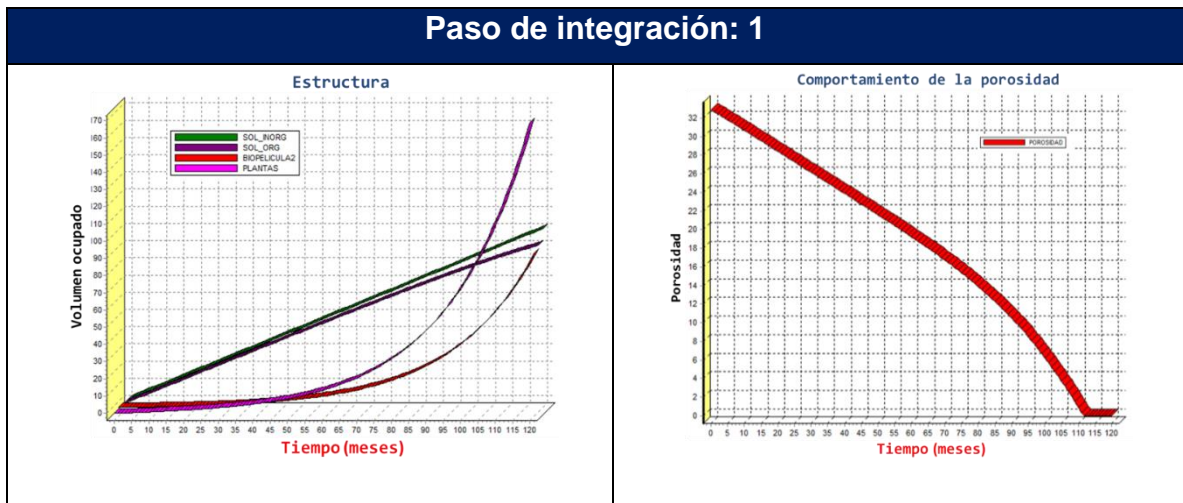
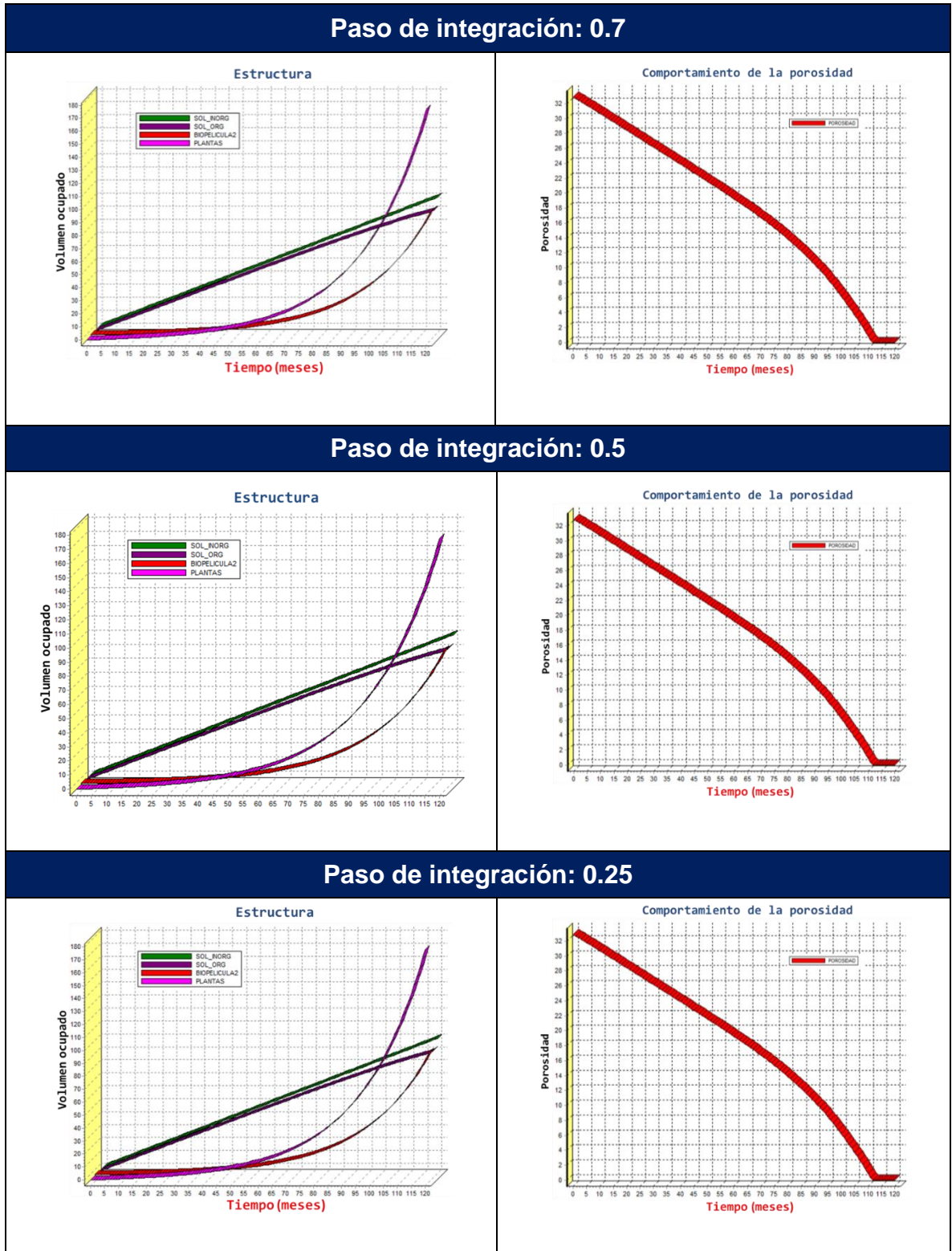


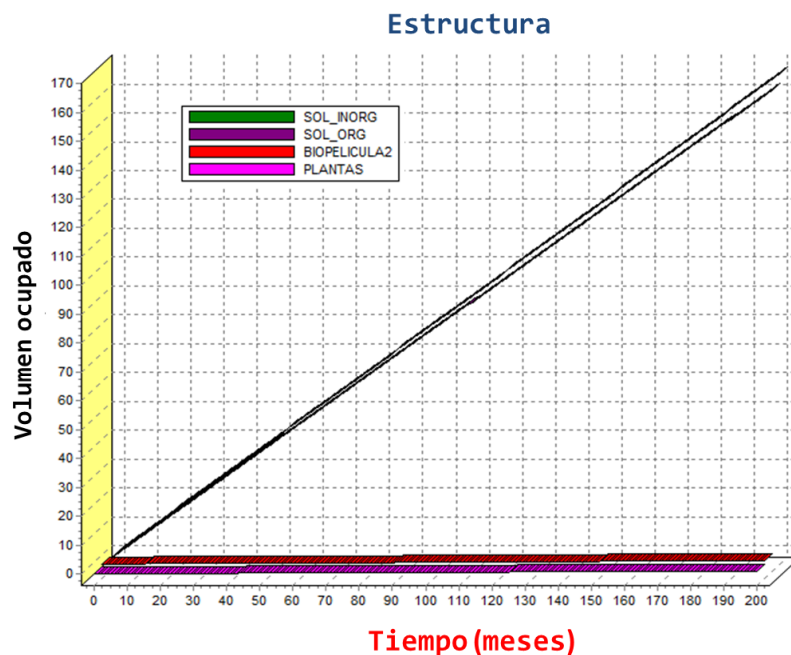
Tabla 15. (Continuación)



## 9.7 PRUEBAS DE COMPORTAMIENTOS ANÓMALOS

Eliminar una estructura de realimentación importante implica un comportamiento anómalo en el sistema, esto queda en evidencia cuando al eliminar el ciclo de realimentación de la biopelícula con las plantas, se observó una fuerte afectación en la vida útil del sistema, tomando como referencia el escenario base, la vida útil pasa de 112 a 161 meses, además de esto el comportamiento de las variables principales sufrieron un comportamiento anómalo. Dicho comportamiento se ilustra en la figura 26, donde se observa que las raíces de las plantas no ocupan un volumen en el sistema.

Figura 26. Estructura sin intervención de la biopelícula



## 9.8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El objetivo de esta prueba es indagar si la percepción del fenómeno cambia de forma importante cuando varía el valor de los parámetros de una manera controlada,

Evolución cuenta con esta funcionalidad, para aplicar esta prueba se aprovecha este recurso, a continuación se presentan dos análisis de sensibilidad con variación de parámetros:

- Análisis de sensibilidad con variación de parámetros para observar el comportamiento de la vida útil del sistema respecto al volumen del sistema, para ello se parte del escenario base, se convierte la variable volumen a un parámetro el cual inicia en 1460 m<sup>3</sup> y va aumentando en 100 m<sup>3</sup> tras cada iteración, como resultado se corrobora que la vida útil del humedal aumenta a medida que el volumen de este también aumenta según la siguiente tabla:

Tabla 16. Resultado Análisis de Sensibilidad Volumen/ Vida Útil

Volumen (m <sup>3</sup> )	Vida útil (Meses)
1460	110
1560	113
1660	116
1760	118
1860	121
1960	122
2060	124
2160	126
2260	128
2360	129
2460	131

- Análisis de sensibilidad con variación de parámetros para observar el comportamiento del volumen del sistema respecto al caudal de entrada, para ello se parte del escenario base, en donde el caudal de entrada es de 200  $\left[\frac{m^3}{d}\right]$  el cual aumenta de 100  $\left[\frac{m^3}{d}\right]$  en 100  $\left[\frac{m^3}{d}\right]$  tras cada iteración, como resultado se

corroborar que el volumen del humedal aumenta en la medida que el caudal de entrada aumenta.

Tabla 17. Resultado Análisis de Sensibilidad Caudal de Entrada/ Volumen

Caudal de entrada [ $\frac{m^3}{d}$ ]	Volumen [ $m^3$ ]
200	1459
300	2189
400	2918
500	3648
600	4378
700	5108
800	5837
900	6567
1000	7297
1100	8026
1200	8756

### 9.9 CRITERIO DE UTILIDAD

El modelo desarrollado es útil para obtener los parámetros de diseño adecuados para construir un humedal de flujo subsuperficial horizontal para ciertas características de entrada; bajo el escenario descrito el modelo puede determinar la vida útil del sistema, igualmente es consistente con el objetivo principal del estudio, ya que permite obtener los parámetros de diseño y estudiar la colmatación del sistema en el tiempo.

### 9.10 CRITERIO DE CONFIANZA

Al realizar simulaciones en un escenario base, tomar decisiones, modificar parámetros y volver a simular, se observa que la simulación obtenida se acerca al funcionamiento real bajo las mismas condiciones, por lo tanto el modelo cuenta con un grado de confianza aceptable para el propósito del estudio.

## **9.11 DOCUMENTACIÓN**

Para el prototipo construido se elaboró la documentación de los elementos del modelo, también se realizó la revisión bibliográfica que soporta las investigaciones relacionadas al objeto de estudio. A continuación se especifica la documentación anexa al documento:

**9.11.1 Descripción de Elementos.** Cada variable utilizada en el modelo, cuenta con su respectiva documentación, que consta del nombre del elemento, tipo de elemento, ecuación, unidades, descripción, referencia y límites de los parámetros, al relacionar todas las variables, se puede observar que el modelo tiene consistencia dimensional, que corresponde a la tercera prueba que recomienda Sterman aplicar a un modelo para determinar su validez.

**9.11.2 Evolución de prototipos.** En el anexo 4 se relaciona la documentación respecto a la evolución de todos los modelos utilizados, en donde se puede observar el crecimiento en cobertura y complejidad al abordar el fenómeno de estudio, el documento contiene el nombre de prototipo con un resumen y una pequeña imagen descriptiva. Este documento relaciona todos los prototipos desarrollados en Evolución 4.5.

## 10. EXPERIMENTOS GUIADOS SIMULADOS

El ambiente software que se ha desarrollado para presentar la información, ofrece el acceso a dos simuladores diferentes dependiendo del rol del usuario, sea básico o experto. A continuación se proponen experimentos guiados que permiten probar algunas funcionalidades del modelo.

### 10.1 USUARIO BÁSICO

El alcance de este tipo de usuario se limita a la modificación de los parámetros iniciales. Para la simulación del escenario base el usuario básico debe ingresar los siguientes parámetros:

- Caudal de Entrada:  $200 \frac{m^3}{d}$
- Concentración de DBO Caudal de Entrada:  $140 \frac{mg}{L}$
- Concentración de Sólidos orgánicos en el caudal de entrada:  $140 \frac{mg}{L}$
- Concentración de DBO Salida:  $20 \frac{mg}{L}$
- Tipo de Grava: Arenas Gravasas

El diseño recomendado esperado será:

- Largo: 43.78 m
- Ancho: 111.11 m
- Cantidad de celdas:3
- Ancho por celda: 37.04 m
- Área Superficial:  $48677.77 m^2$
- Relación Largo/Ancho obtenido: 1.18
- Vida útil: 112 meses

Al modificar los parámetros de entrada, el usuario básico obtendrá los parámetros de los factores de diseño recomendados, los límites de los parámetros de entrada ya están establecidos en la interfaz de usuario básico. Se recomienda al usuario, realizar simulaciones variando los parámetros, esto le permitirá formular interrogantes que conduzcan a una mejor comprensión del fenómeno, algunos interrogantes que se plantean son:

- ¿Qué sucede al aumentar o disminuir el caudal de entrada respecto al diseño obtenido?
- ¿Qué sucede al aumentar o disminuir la concentración de DBO en el caudal de entrada respecto al diseño obtenido?
- ¿Qué sucede al aumentar o disminuir la concentración de DBO en el efluente respecto al diseño obtenido?
- ¿Qué sucede al elegir los diferentes tipos de grava respecto al diseño obtenido?

## **10.2 USUARIO EXPERTO**

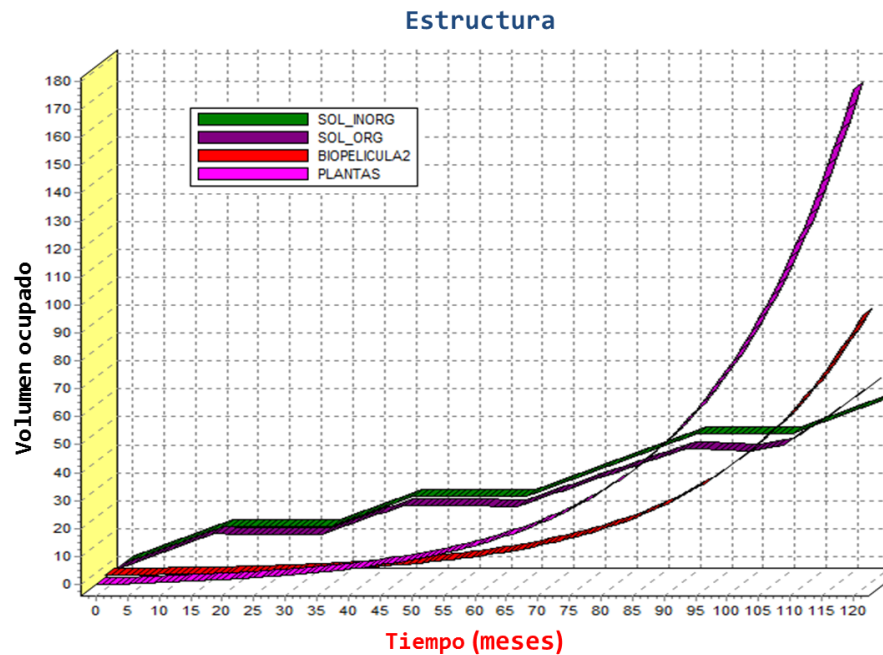
El usuario experto tiene mayor libertad al momento de interactuar con el modelo, ya que tiene acceso para modificar y observar el comportamiento de todos los elementos de sistema, además de esto la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad por variación de escenarios y parámetros.

A modo de ejemplo, a continuación se propone aplicar dos experimentos:

- 1. Funcionamiento de un humedal en Modo Batch:** para el escenario Batch, se realiza la simulación manualmente utilizando las funcionalidades ofrecidas en Evolución: “Paso de simulación” y “modificar variables” con el fin de interrumpir el flujo del caudal de entrada cada quince días de forma periódica.

Se observa la afectación en los sólidos orgánicos y en los sólidos inorgánicos, mientras que en las plantas y en la biopelícula la afectación es mucho menor, la vida útil del sistema con este escenario de simulación aumenta en 10 meses.

Figura 27. Comportamiento del sistema en Modo Batch



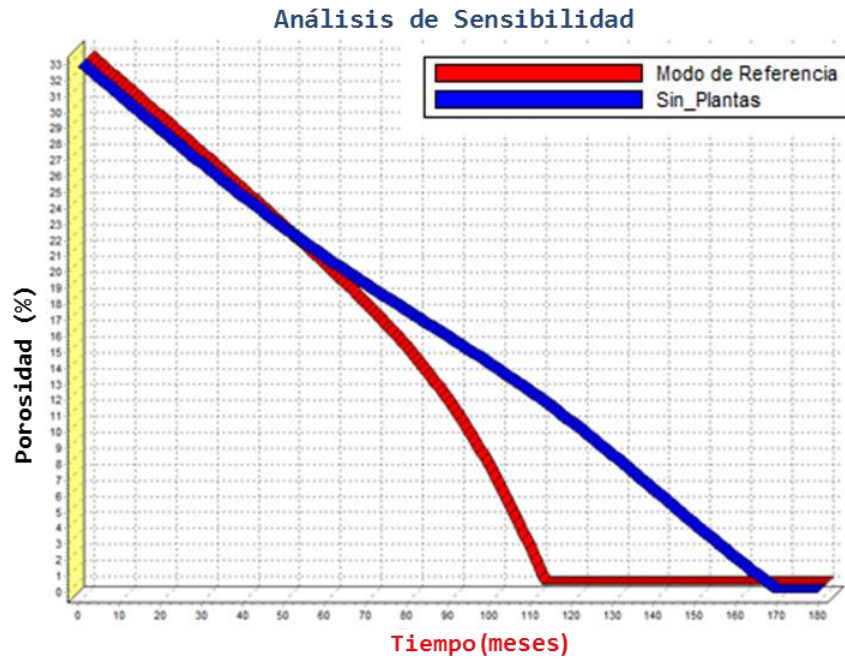
**2. Influencia de las plantas en la colmatación del sistema:** para este experimento se utiliza el escenario base descrito anteriormente en la Tabla 8 y se crea el escenario “Sin\_Plantas”, asignando una tasa de crecimiento a las plantas igual a 0.

Tabla 18. Parámetros escenario sin plantas

Parámetro	Valor
Caudal Entrada	200 ( $\frac{m^3}{día}$ )
Concentración Contaminante DBO afluente	140 ( $\frac{mg}{l}$ )
Concentración Contaminante DBO efluente	20 ( $\frac{mg}{l}$ )
Tipo de Grava	Arenas gravosas
Constante cinética de primer orden	0.08 ( $\frac{m}{d}$ )
Factor de seguridad	5
Pendiente	1%
Profundidad	0.3 m
Modo Batch	0
Densidad	1030 ( $\frac{kg}{m^3}$ )
Tasa de crecimiento de los sólidos Orgánicos por efecto de las plantas	0.01 ( $\frac{1}{mes}$ )
Tasa de Biodegradación	0.013 ( $\frac{1}{mes}$ )
Tasa de crecimiento de la biopelícula por efecto de los sólidos orgánicos.	0.08 ( $\frac{1}{mes}$ )
Tasa de crecimiento de la biopelícula por efecto de las plantas adultas	0.05 ( $\frac{1}{mes}$ )
Tasa de crecimiento de las plántulas	0 ( $\frac{1}{mes}$ )
Tasa de aumento de las plantas por efecto de la biopelícula	0 ( $\frac{1}{mes}$ )
Tasa de muertes de las plantas	0.05 ( $\frac{1}{mes}$ )
Fluctuación Caudal de Entrada	0

En la siguiente figura se observa un análisis de sensibilidad por variación de escenarios, para HCFSSH con o sin plantas.

Figura 28. Análisis de sensibilidad por variación de escenarios



El comportamiento del sistema es coherente con el análisis que realiza Pedescoll, (ver estado del arte, sección 4.3.3.) en donde un HCFSSH sin plantas tendrá mayor vida útil que un HCFSSH con plantas.

## **11. AMBIENTE SOFTWARE “HUMEDALES CFSSH 2015”**

Humedales CFSSH 2015, es una herramienta software que le ofrece al usuario facilidad para interactuar y visualizar la metodología de los cinco lenguajes (lenguaje en prosa, diagrama de influencias, diagrama de flujos y niveles, lenguaje de ecuaciones y comportamiento) del modelo construido en Evolución 4.5.

El ambiente software ofrece dos accesos diferentes según el rol del usuario, básico o experto; el rol de usuario básico permite la manipulación del modelo construido con mayor usabilidad a través de una interfaz gráfica amigable, con menos complejidad que operar directamente el modelo en Evolución lo que corresponde al usuario experto en Dinámica de Sistemas, permitiéndole aprovechar las herramientas de modelado y simulación que ofrece Evolución 4,5.

La construcción del ambiente software “Humedales CFSSH 2015” se realizó utilizando el entorno de desarrollo flexible Delphi 7, que utiliza el paradigma de programación visual orientada a objetos y permite diferentes tipos de desarrollos, como aplicaciones de escritorio, móviles, web, etc.. El lenguaje utilizado por este software es Object Pascal (versión moderna de Pascal) y se eligió utilizar debido a que permite la integración de un modelo nativo construido en Evolución.

### **11.1 DISEÑO AMBIENTE SOFTWARE**

La pantalla inicial contiene tres secciones principales: Simuladores, Metodología de los cinco lenguajes e Información.

La sección Simuladores, contiene el acceso al modelo de simulación desarrollado en Evolución versión 4.5 junto con la interfaz gráfica que permiten al usuario inexperto en modelamiento y dinámica de sistemas realizar experimentos y obtener

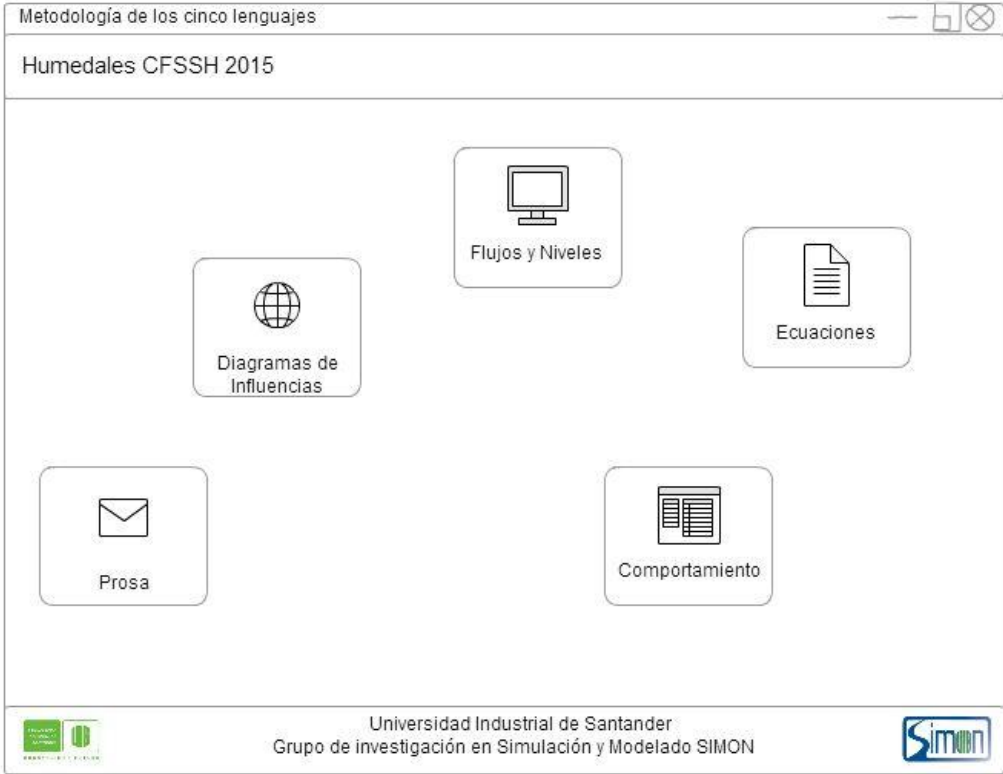
los factores de diseño apropiados maximizando el tiempo de vida útil del sistema. Por otro lado, el usuario experto accede directamente al software Evolución en donde tendrá la libertad de interactuar con todas las funcionalidades que este ofrece.

El ícono Metodología de los cinco lenguajes le da la posibilidad al usuario de ver el modelo desarrollado en cada uno de los lenguajes que propone la metodología de esta investigación. Finalmente el ícono Información contiene datos de los autores, agradecimientos e información del modelo y la interfaz. A continuación se ilustra el diseño del ambiente software.

Figura 29. Pantalla principal ambiente software Humedales CFSSH 2015



Figura 30. Pantalla Metodología de los cinco lenguajes



Esta sección permite visualizar el desarrollo metodológico del prototipo funcional en cada uno de los cinco lenguajes de la metodología utilizada.

Figura 31. Pantalla información



Esta sección ofrece información del modelo, la interfaz, los autores y los agradecimientos.

En el Anexo 5 del presente trabajo, se observa el acabado del ambiente software Humedales CFSSH 2015. El siguiente enlace <https://www.youtube.com/watch?v=VezGaLhUznA> direcciona hacia un video alojado en Youtube en el cual se puede observar el funcionamiento del mismo.

## 11.2 TIPOS DE USUARIO DE LOS SIMULADORES

Figura 32. Identificación de actores de los simuladores



## 11.3 DESCRIPCIÓN DE ACTORES

Tabla 19. Descripción usuario básico

Actor	Usuario básico
Casos de Uso	Iniciar simulación, pausar simulación, detener simulación, modificar parámetros, elegir tiempo de simulación, guardar simulación, abrir simulación, visualizar resultados de simulación.
Tipo	Primario
Descripción	Es el actor con desconocimiento en dinámica de sistemas, no está en la capacidad de operar directamente el modelo construido en Evolución. Por consiguiente el actor sólo podría llevar el estudio del fenómeno a través de un ambiente software que le permitirá experimentar el comportamiento del fenómeno mediante la modificación de parámetros y la visualización de resultados concretos de simulación de las variables de interés, la interfaz ofrecida al usuario opera bajo el escenario base del modelo de simulación.

Tabla 20. Descripción usuario experto

Actor	Usuario Experto
Casos de Uso	Abrir modelo en evolución, guardar modelo en evolución, iniciar simulación, pausar simulación, detener simulación, modificar parámetros, elegir tiempo de simulación, visualizar resultados de simulación, interactuar con software evolución.
Tipo	Primario
Descripción	Es el actor con conocimiento en dinámica de sistemas, está en la capacidad de operar directamente el modelo construido en el software Evolución 4.5. En donde tiene la libertad utilizar todas las herramientas que este ofrece, como realizar simulaciones, probar políticas y observar la vida útil de los diseños probados.

## 11.4 DIAGRAMAS DE CASOS DE USO

Figura 33. Diagrama caso de uso usuario básico

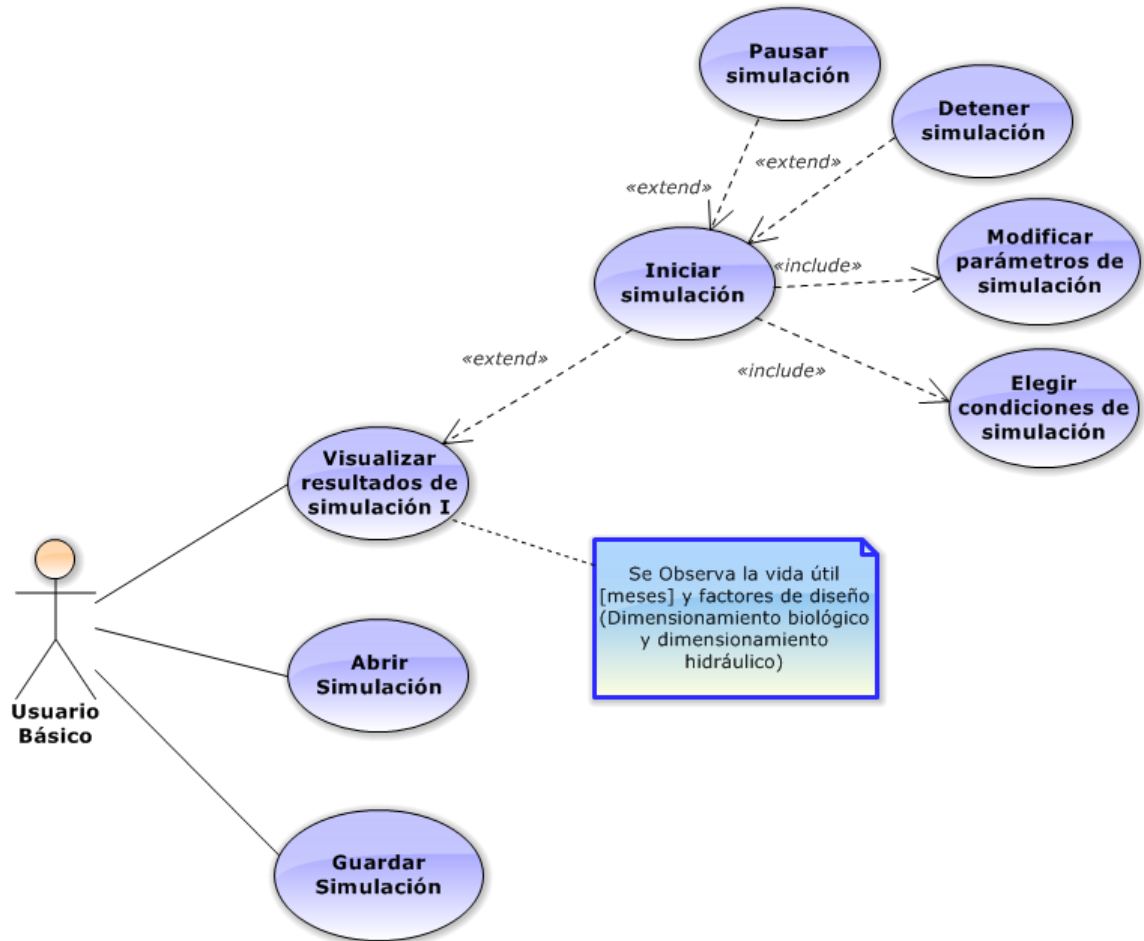
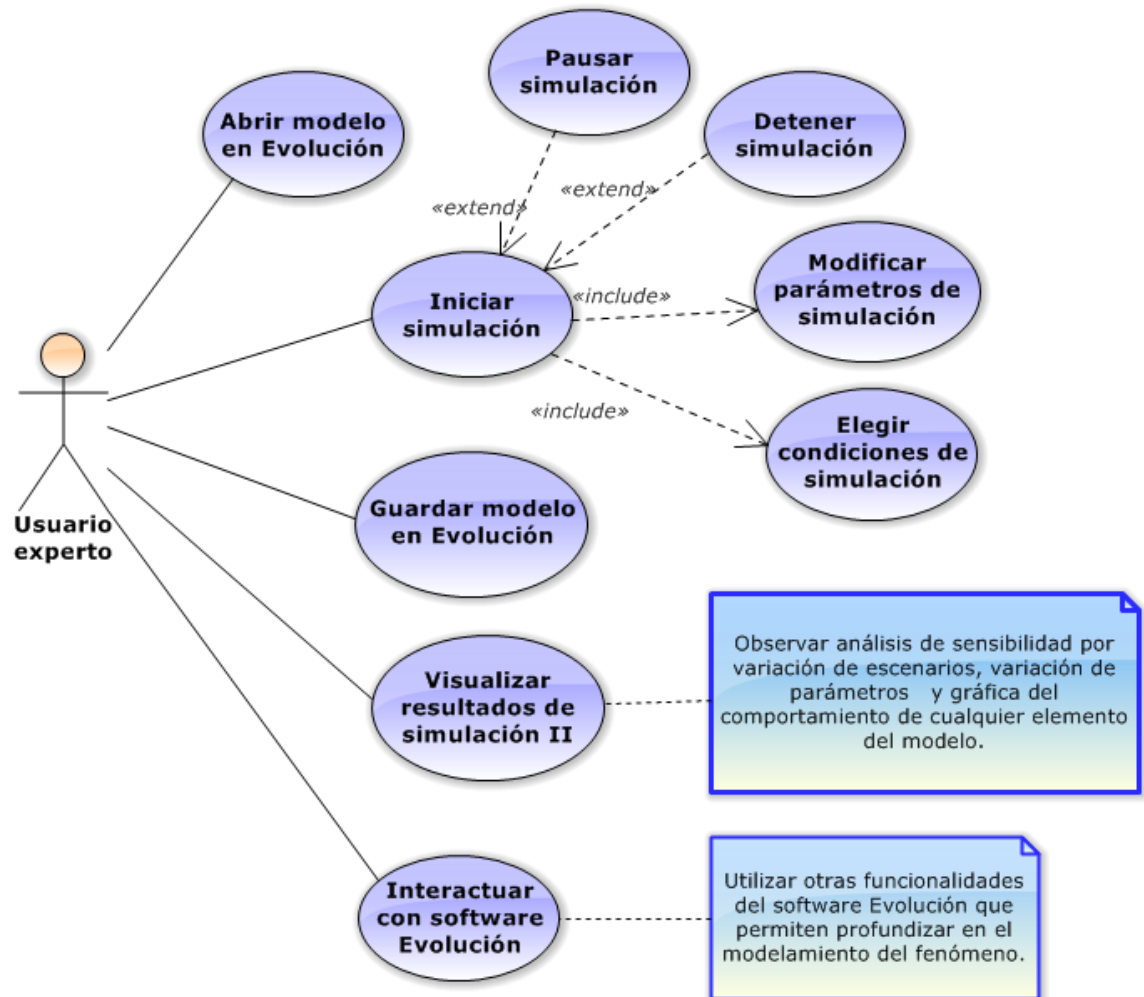


Figura 34. Diagrama caso de uso usuario experto



## 11.5 ESPECIFICACIÓN DE CASOS DE USO

Tabla 21. Descripción caso de uso guardar simulación

Caso de uso		Guardar simulación
Actores	Usuario Básico	
Tipo	Básico	
Propósito	Permitir al usuario guardar una simulación que haya realizado.	
Resumen	El usuario cuenta con la opción de guardar las simulaciones realizadas en archivos de texto, al darle clic en el botón de Guardar, guardara en la máquina donde esté ejecutando la interfaz los valores de los parámetros de entrada y los valores del diseño obtenido.	
Precondiciones	Se requiere haber elegido el tipo de usuario básico.	
Flujo Principal	En la interfaz de usuario Básico se encuentra el botón de Guardar, cuando el usuario hace clic en él, guardará el estado actual de los parámetros de simulación, tanto de la configuración inicial de simulación como los resultados de simulación, (Dimensionamiento hidráulico, dimensionamiento biológico y vida útil). Luego de presionar el botón el usuario deberá ingresar en un formulario el nombre de la simulación y una ubicación para guardarla.	
Subflujos	Ninguno	
Excepciones	No se debe estar ejecutando ninguna simulación.	
Post-Condiciones	Elegir ubicación en donde guardar el archivo generado y Asignar nombre al archivo a guardar.	

Tabla 22. Descripción caso de uso abrir simulación

Caso de uso		Abrir simulación
Actores	Usuario Básico	
Tipo	Básico	
Propósito	Permitir al usuario abrir una simulación anteriormente guardada.	
Resumen	El usuario puede cargar una simulación usando el botón de Abrir. Cuando este es presionado emerge una ventana en la cual puede buscar la configuración anteriormente guardada.	

Tabla 22. (Continuación)

<b>Caso de uso</b>		<b>Abrir simulación</b>
Precondiciones	Para poder abrir alguna simulación, se debe contar con un archivo que contenga una simulación y haya sido guardado en alguna ubicación de la máquina.	
Flujo Principal	El usuario básico en su interfaz encuentra el botón de Abrir, al presionar el botón se abre un formulario que solicita al usuario indicar un archivo dentro de la máquina para cargarlo, el archivo cuenta con los datos de alguna simulación generada y guardada con anterioridad. La interfaz mostrará los datos de la simulación anterior.	
Subflujos	Ninguno	
Excepciones	No se debe estar ejecutando ninguna simulación.	
Post-Condiciones	Ninguna	

Tabla 23. Descripción caso de uso abrir modelo en Evolución

<b>Caso de uso</b>		<b>Abrir modelo en Evolución</b>
Actores	Usuario experto	
Tipo	Básico	
Propósito	Abrir el modelo de simulación del fenómeno, el acceso a este modelo lo provee la interfaz gráfica	
Resumen	Una vez ingresado al sistema y haber seleccionado el tipo de usuario, se puede acceder al modelo de simulación directamente en el software Evolución 4.5	
Precondiciones	Se requiere haber elegido el tipo de usuario para ingresar al ambiente software pertinente. El usuario debe tener instalado el software Evolución 4.5 en su máquina	
Flujo Principal	En la pantalla principal el usuario tiene el ícono de acceso llamado “usuario experto”, al presionarlo se abre el software Evolución 4.5 cargando automáticamente el modelo del fenómeno de estudio con el cual podrá hacer uso de todas las funcionalidades que ofrece Evolución 4.5	
Subflujos	Ninguno	
Excepciones	Si el usuario no tiene instalado el software Evolución 4.5, este no abrirá	
Post-Condiciones	Mostrará el modelo en el software Evolución 4.5	

Tabla 24. Descripción caso de uso guardar modelo en Evolución

<b>Caso de uso</b>		<b>Guardar modelo en Evolución</b>
Actores	Usuario experto	
Tipo	Básico	
Propósito	Guardar el modelo de simulación en un directorio de la máquina donde se esté ejecutando el sistema, con el fin de no modificar el modelo original y tener un respaldo de la simulación.	
Resumen	Este caso de uso es iniciado por el usuario experto. Una vez ingresado al sistema y haber seleccionado el tipo de usuario puede hacer uso de esta funcionalidad.	
Precondiciones	Se requiere haber accedió atreves del ícono del usuario experto y tener el modelo abierto en el software Evolución.	
Flujo Principal	El usuario debe tener abierto el software Evolución 4.5 con el modelo cargado, al hacer clic en el botón “Guardar como”, se despliega un formulario que le solicita indicar el lugar para guardar el modelo junto con el nombre de este, se recomienda guardar el modelo con un nuevo nombre para no modificar el modelo original.	
Subflujos	Ninguno	
Excepciones	No se debe estar ejecutando ninguna simulación.	
Post-Condiciones	Ninguno	

Tabla 25. Descripción caso de uso visualizar resultados de simulación I

<b>Caso de uso</b>		<b>Visualizar resultados de simulación I</b>
Actores	Usuario Básico	
Tipo	Básico	
Propósito	Permitir al usuario observar los resultados de la simulación ejecutada.	
Resumen	El usuario básico observa en la interfaz los resultados de la simulación ejecutada, la dinámica de la vida útil en el tiempo, y los factores de diseño del HCFSSH que llevan a este resultado. (Dimensionamiento hidráulico y dimensionamiento biológico)	
Precondiciones	Abrir una simulación anterior, o iniciar una simulación.	

Tabla 25 (Continuación)

<b>Caso de uso</b>		<b>Visualizar resultados de simulación I</b>
Flujo Principal	Una vez el usuario haya iniciado una simulación, se le presenta a este los resultados de la siguiente manera: en la parte superior derecha de la interfaz él puede observar la dinámica de la porosidad en el tiempo, en la parte inferior puede observar el valor que toman el dimensionamiento hidráulico y el dimensionamiento biológico.	
Subflujos	Ninguno	
Excepciones	No se debe estar ejecutando ninguna simulación.	
Post-Condicion	Ninguna	

Tabla 26. Descripción caso de uso visualizar resultados de simulación II

<b>Caso de uso</b>		<b>Visualizar resultados de simulación II</b>
Actores	Usuario Experto	
Tipo	Básico	
Propósito	Permitir al usuario observar los resultados de las simulaciones que trae el modelo en Evolución ya ejecutadas y observar los resultados de las nuevas simulaciones creadas.	
Resumen	El usuario experto puede observar en Evolución los resultados de las diferentes simulaciones creadas con anterioridad por el investigador, y además de esto permite observar análisis de sensibilidad por variación de escenarios, variación de parámetros y observar la dinámica de cualquier elemento del modelo.	
Precondiciones	Abrir modelo en Evolución, o iniciar una simulación.	
Flujo Principal	Se presenta al usuario experto la interfaz del software evolución, el usuario puede visualizar los resultados de simulación eligiendo cualquier de las siguientes opciones: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Para ver los resultados de análisis de sensibilidad por variación de escenarios, elegir la ventana "Sensibilidad_escenarios"</li> <li>2. Para ver los resultados del análisis de sensibilidad por variación de parámetros, elegir la ventana "Sensibilidad_Parametros"</li> <li>3. Para ver el comportamiento de los elementos del modelo, elegir la ventana "Graficador"</li> </ol>	

Tabla 26 (Continuación)

<b>Caso de uso</b>		<b>Visualizar resultados de simulación II</b>
Subflujos	Ninguno	
Excepciones	No se debe estar ejecutando ninguna simulación.	
Post-Condiciones	Ninguna	

Tabla 27. Descripción caso de uso iniciar Simulación

<b>Caso de uso</b>		<b>Iniciar Simulación</b>
Actores	Usuario Básico y Usuario Experto	
Tipo	Básico	
Propósito	Permitir al usuario iniciar una simulación.	
Resumen	La principal funcionalidad de los simuladores es brindarle al usuario la posibilidad de observar el comportamiento de un fenómeno bajo determinadas condiciones. Para realizar una simulación el usuario debe modificar los parámetros de entrada y elegir el tiempo de simulación.	
Precondiciones	Abrir una simulación anterior, o modificar parámetros de entrada y tiempo de simulación de una nueva simulación.	
Flujo Principal	El usuario debe modificar los parámetros y elegir un tiempo de simulación, si cuenta con una simulación anterior la puede cargar y luego proceder a iniciar una nueva dando clic en el botón iniciar.	
Subflujos	Ninguno	
Excepciones	Ninguna	
Post-Condiciones	Ninguna	

Tabla 28. Descripción caso de uso pausar simulación

<b>Caso de uso</b>		<b>Pausar Simulación</b>
Actores	Usuario Básico y Usuario Experto	
Tipo	Básico	
Propósito	Permitir al usuario pausar una simulación ya iniciada.	
Resumen	El usuario tiene la posibilidad de pausar una simulación en cualquier instante de su desarrollo para luego retomarla. Pausar la simulación implica que se detenga la iteración, guardando todos los resultados de esta.	

Tabla 28 (Continuación)

<b>Caso de uso</b>		<b>Pausar Simulación</b>
Precondiciones	Contar con una simulación ya iniciada	
Flujo Principal	Luego de que el usuario inicia una simulación, tiene la opción de pausarla si le da clic en el botón "Pausar".	
Subflujos	Ninguno	
Excepciones	Ninguna	
Post- Condiciones	Ninguna	

Tabla 29. Descripción caso de uso detener simulación

<b>Caso de uso</b>		<b>Detener Simulación</b>
Actores	Usuario Básico y Usuario Experto	
Tipo	Básico	
Propósito	Permitir al usuario detener una simulación ya iniciada.	
Resumen	El usuario tiene la posibilidad de detener una simulación en cualquier instante de esta, sin embargo, al detenerla no podrá retomarla.	
Precondiciones	Contar con una simulación ya iniciada	
Flujo Principal	Luego de que el usuario inicia la simulación, le da clic en el botón detener, por lo que el motor de evolución se paraliza e inicializa el tiempo de simulación.	
Subflujos	Ninguno	
Excepciones	Ninguna	
Post-Condiciones	Ninguna	

Tabla 30. Descripción caso de uso modificar parámetros de simulación

<b>Caso de uso</b>		<b>Modificar parámetros de simulación</b>
Actores	Usuario Básico y usuario Experto	
Tipo	Básico	
Propósito	Permitir al usuario modificar el valor de cualquier parámetro.	
Resumen	El usuario puede modificar el valor de los parámetros de entrada para posteriormente realizar simulaciones.	

Tabla 30. (Continuación)

<b>Caso de uso</b>	<b>Modificar parámetros de simulación</b>
Precondiciones	No debe haber una simulación corriendo.
Flujo Principal	El usuario observa las variables que puede modificar en la pantalla principal, luego de modificarlas puede realizar la respectiva simulación.
Subflujos	Ninguno
Excepciones	Los parámetros están dentro de cierto rango correspondiente con su tipo.
Post-Condiciones	La simulación se verá afectada por el valor que tomen estos parámetros.

Tabla 31. Descripción caso de uso elegir tiempo de simulación

<b>Caso de uso</b>	<b>Elegir tiempo de simulación</b>
Actores	Usuario Básico y usuario experto.
Tipo	Básico
Propósito	Permitir al usuario elegir el tiempo de simulación.
Resumen	El usuario tiene la posibilidad de elegir el tiempo de simulación que corresponde a la vida útil del HCFSSH. Se recomienda que este tiempo sea mayor a 200, sin embargo, la simulación se detiene cuando termine la vida útil del sistema sin importar que el tiempo de simulación elegido sea mayor, por lo tanto este parámetro se convierte en un tiempo de referencia.
Precondiciones	No debe haber una simulación corriendo.
Flujo Principal	El usuario elige el tiempo de simulación en la interfaz gráfica.
Subflujos	Ninguno.
Excepciones	Ninguno.
Post-Condiciones	Ninguna.

## **12.LOGROS Y DIFUSIÓN**

El presente trabajo se ha divulgado a nivel nacional e internacional, oportunidad que ha sido clave para enriquecer la investigación producto de las recomendaciones recibidas por parte de los evaluadores, la experiencia y el conocimiento de trabajos de la misma metodología bajo la aplicación de diferentes áreas . Los eventos en los cuales se participó se relacionan a continuación:

### **12.1 DIFUSIÓN NIVEL NACIONAL**

El primer prototipo fue presentado y aceptado como ponencia en el XII Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas (ECDS), 27 al 29 de Agosto de 2014, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá-Colombia.

Con esta participación se realizó la publicación de un artículo en las memorias del congreso.

### **12.2 DIFUSIÓN A NIVEL INTERNACIONAL**

Una versión intermedia entre el prototipo inicial y el prototipo final, fue propuesta y aceptada como ponencia en el XII Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas, 9 al 11 de Diciembre de 2014, INCAE Business School, Alajuela- Costa Rica. En este evento también se logró la publicación de un artículo.

También se realizó la postulación como ponencia en el XIII Congreso Latinoamericano y Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, que se llevará a cabo del 21 al 23 de Octubre de 2015, en la ciudad de Cartagena de Indias – Colombia, con el fin de compartir con la comunidad el prototipo final consignado en este documento.

### 13. CONCLUSIONES

- La hipótesis dinámica básica planteada representó el comportamiento de los HCFSSH, en donde la vida útil del sistema se ve afectada por la interacción de los sólidos orgánicos e inorgánicos con la biopelícula y las raíces de las plantas adultas, una vez se desarrolló el modelo los resultados del escenario simulado demostraron un comportamiento similar al del fenómeno de estudio.
- El modelado mediante dinámica de sistemas permitió representar a través del lenguaje gráfico de flujos y niveles la dinámica de la interacción de los elementos del HCFSSH, permitiendo su lectura a los usuarios con nociones básicas de DS y sin conocimiento profundo en el tema de estudio, es así como al representar las características pertinentes al fenómeno este lenguaje permite el entendimiento del mismo.
- El modelo desarrollado permite a partir de diferentes escenarios simulados:
  - Obtener los parámetros de diseño adecuados para construir un humedal de flujo subsuperficial horizontal.
  - Brindar la posibilidad de realizar experimentos y probar políticas en búsqueda de alternativas que permitan aumentar la vida útil del sistema.
  - Garantizar el cumplimiento con el límite de vertimiento establecido en la legislación ambiental colombiana (Resolución 0631 de 2015).
- La interfaz gráfica de usuario ofrece facilidades en la manipulación del modelo construido brindando la posibilidad a usuarios no conocedores de dinámica de sistemas, obtener los parámetros de diseño adecuados para diferentes escenarios simulados.

- La investigación fue aceptada como ponencia en el XII ECDS y en el XII CLADS lo que demuestra el interés de la comunidad colombiana y latinoamericana de DS en este tipo de investigaciones, por otro lado son pocos los estudios que abordan el fenómeno de la colmatación en HCFSSH desde el paradigma de esta metodología, corroborando que es un campo amplio por explorar.

## 14.RECOMENDACIONES

- El modelo actual asume que la colmatación se produce de forma uniforme en el sistema, se ha demostrado que en los primeros años de funcionamiento el fenómeno de la colmatación suele ser mayor en el primer tercio del humedal, por lo tanto se recomienda ajustar el modelo teniendo en cuenta esta condición.
- Algunos parámetros fueron ajustados según el criterio del modelador y/o experto, sin embargo, para ofrecer mayor robustez al modelo se pueden respaldar con datos de un HCFSSH real.
- El usuario básico puede utilizar la interfaz gráfica para modificar los parámetros de entrada al sistema y obtener el diseño recomendado, no obstante, se recomienda ofrecer la posibilidad de que los resultados obtenidos puedan ser modificados por el usuario, dado que en algunos escenarios es necesario ajustarse a la disponibilidad del terreno.
- Esta investigación modeló la colmatación física y biológica, para futuros trabajos se recomienda aumentar la complejidad y cobertura del modelo incluyendo la colmatación bioquímica.
- No fue propósito de esta investigación estudiar a nivel micro los procesos de depuración de aguas residuales, sin embargo, se recomienda para futuras investigaciones profundizar en la DBO, DQO, la desadeherencia de la biopelícula al material granular, la cantidad de nitrógeno, fosforo y de otros contaminantes en el agua residual.

- El prototipo fue desarrollado en Evolución 4.5 (build 25), esta versión ofreció las herramientas necesarias para construir el modelo producto de la investigación en cinco lenguajes diferentes, sin embargo, se manifiestan a consideración las siguientes recomendaciones que pueden ayudar al investigador en su tarea:
  - Para el desarrollo de futuros trabajos se recomienda utilizar la última versión de Evolución liberada por el grupo de investigación SIMON, dado que las nuevas versiones cuentan con procesamiento en paralelo y ofrecen al usuario una mejor experiencia de uso.
  - Agregar un campo adicional en el formulario de cada elemento del modelo para incluir la referencia de donde es tomada.
  - Ofrecer la posibilidad de agregar subíndices y superíndices en el campo descripción para colocar las unidades de las ecuaciones según los estándares.
  - Evitar que se coloquen funciones en los parámetros, dado que los parámetros no cambian en el tiempo.
  - Mostrar el nombre del modelo abierto en la parte superior de la ventana.
  - Ofrecer la posibilidad a los elementos tipo clon, de tomar el color de la variable original

## BIBLIOGRAFÍA

- ALEMANIA. AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DE ALEMANIA, GIZ. HOFFMANN, Heike *et al.* Programa de Saneamiento Sostenible ECOSAN. Revisión técnica de humedales artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas. Traducido al español por Rotaria del Perú SAC. 2011
- ANDRADE SOSA, Hugo H. *et al.* Diversidad en búsqueda de unidad: Capítulo 3. 2007.
- -----. Evolución: herramienta software para modelado y simulación con Dinámica de Sistemas. Revista Dinámica de Sistemas. Vol. 5. p. 6.
- -----. Pensamiento Sistémico: Diversidad en búsqueda de Unidad. 2001. p. 235.
- -----. Evolución: herramienta software para modelado y simulación con Dinámica de Sistemas. Revista de Dinámica de Sistemas Vol. 5 Núm. 1 p.11
- CASELLES OSORIO, Aracelly. Influence of the characteristics of organic matter on the efficiency of horizontal subsurface-flow constructed wetlands. Tesis doctoral. Cataluña. Universidad Politécnica de Cataluña. 2006. p. 15.
- COLOMBIA. CRA COMISIÓN DE REGULACIÓN DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. Evolución de las coberturas de los servicios de acueducto y alcantarillado (1985-2013).p. 52
- COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 de 2015.

- -----,----- Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico. RAS Definición del nivel de complejidad y evaluación de la población, la dotación y la demanda de agua.
  
- COLOMBIA. Plan nacional de manejo de aguas residuales municipales en Colombia .Bogotá D.C. 2004. p. 8.
  
- Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabanba, Bolivia. 2010. ISBN 978-99954-766-2-5.
  
- ESTADOS UNIDOS. EPA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales-Humedales de flujo subsuperficial. Washington, D.C. 2000. p.1.
  
- -----,----- Washington, D.C. 2000. p.5.
  
- FLEMING, I.R.; ROWE, R.K. Y CULLIMORE, D.R. Field observations of clogging in a landfill leachate collection system. Canadian Geotechnical Journal. 1999. p. 687
  
- GARCÍA SERRANO, Joan y CORZO HERNÁNDEZ, Angélica. Depuración con Humedales Construidos: Guía práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. España.2008.
  
- -----,----- España. Capítulo 6: Factores de Diseño. 2008. p.61
  
- -----,----- España. . p.60.
  
- ITRC INTERSTATE TECHNOLOGY & REGULATORY COUNCIL. Technical and regulatory guidance document for constructed treatment wetlands. 2003.

- KNOWLES, Paul *et al.* Clogging in subsurface–flow treatment wetlands: Occurrence and contributing factors. En: Ecological Engineering. Octubre, 2010. vol.37. p. 99-112.
- MUDGETT, Leslie A. A System dynamics Approach to Modelling the Degradation of Biochemical Oxygen Demand in a Constructed Wetland Receiving Stormwater Runoff. Master of Science in Engineering and Environmental Management. School of Engineering Air Force Institute of Technology.1995.
- PEDESCOLL ALBACAR, Anna. Colmatación en Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Horizontal. Tesis Doctoral Tecnología Agroalimentaria y Biotecnología. Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. 2010. p. 25.
- ROGER, Samsó y GARCÍA, Joan. BIO PORE, a mathematical model to simulate biofilm growth and water quality improvement in porous media: Application and calibration for constructed wetlands. En: Ecological Engineering. Febrero, 2013. vol.54. p.116-127.
- ----- . The Cartridge Theory: A description of the functioning of horizontal subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment, based on modelling results. En: Science of the Total Environment. Enero, 2014. vol.473-474. p.651-658.
- SORIANO MORON, Carlos. Caracterización de la materia particulada de la línea de aguas residuales de un sistema de humedales construido. Tesis de Especialización. Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. 2009. p. 24.
- STERMAN J. D. (2000). Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. NY: McGraw-Hill Higher Education.

- ZHEMIN, Xuan; NI-BIN, Chang y MARTIN, Wenielieta. Modeling the system dynamics for nutrient removal in an innovative septic tank media filter. 2011

## ANEXO A. LENGUAJE DE ECUACIONES PROTOTIPO INICIAL

---

Aume\_Pla\_BioP  
= 0.5

---

Biopelicula  
= 0

---

Caudal\_E  
= 120

---

Crec\_Plantas  
= 2

---

Frac\_Sol\_In  
= 0.2

---

Frac\_Sol\_O  
= 0.1

---

Frac\_Sol\_Pl  
= 0.003

---

In\_BioP  
= (Out\_SO)+(Plan\_Adultas\*Tasa\_Crec\_Bio\_Pl)

---

In\_Pla  
= Biopelicula\*Aume\_Pla\_BioP

---

In\_SO  
= (Caudal\_E\*Frac\_Sol\_O)+(Plan\_Adultas\*Frac\_Sol\_Pl)

---

In\_SoInO  
= Frac\_Sol\_In\*Caudal\_E

---

Indice\_Biopelicu  
= Biopelicula/K\_Biopelic

---

Indice\_Plantas  
= Plan\_Adultas/k\_Plantas

---

---

Indice\_Sol\_InOrg  
= Sol\_InOrg/k\_SoInOrg

---

Indice\_Sol\_Org  
= Sol\_Org/k\_SolOrg

---

K\_Biopelic  
= 1000

---

Out\_Pla  
= Plan\_Iniciales\*Crec\_Plantas

---

Out\_Pla\_Adu  
= Plan\_Adultas\*PV\_Plantas

---

Out\_SO  
= Biopelicula\*Tasa\_de\_Biodegr

---

PV\_Plantas  
= 0.05

---

Plan\_Adultas  
= 0

---

Plan\_Iniciales  
= 1

---

Porosidad  
= Porosidad\_Inicia-(Reducuci\_Por\_SoIn+Reducuci\_Por\_SoOr+Reducuci\_Biopelic+Reducuci\_Plantas)

---

Porosidad\_Inicia  
= 40

---

Reducci\_Biopelic  
= INTLINEAL(2,0,1,0,6)

---

Reducci\_Plantas  
= INTLINEAL(2,0,1,0,10)

---

Reducci\_Por\_SoIn  
= INTLINEAL(2,0,1,0,12)

---

Reducci\_Por\_SoOr  
= INTLINEAL(2,0,1,0,12)

---

Sol\_InOrg  
= 0

---

Sol\_Org  
= 0

---

Tasa\_Crec\_Bio\_Pl  
= 0.018

---

Tasa\_de\_Biodegr  
= 0.001

---

k\_Plantas  
= 1000000

---

k\_SoInOrg  
= 2000

---

k\_SolOrg  
= 2000

## ANEXO B. LENGUAJE DE ECUACIONES PROTOTIPO FINAL

- 
- Ancho  
= Area\_Transersal/h\_Profundidad
- 
- AnchoXCelda  
= Ancho/Numero\_Celdas
- 
- Area\_Superficial  
= IF(Modo\_Batch=0,(Q\_Caudal\_Entrad/Ka\_Const\_Elimina)\*LN(Ci\_Concen\_In/Co\_Concen\_Out),4869.77)
- 
- Area\_Transersal  
= IF(Modo\_Batch=0,Q\_Caudal\_Entrad/(((ks\_Con\_Hidra/Fs\_Factor\_Seguri)\*m\_Pendiente),33.33)
- 
- Biopelicula  
= 0
- 
- Biopelicula2  
= 1
- 
- CD\_SolOr  
= (Caudal\_E\*Ci\_Conce\_In2)\*(1/1000)\*(1/1000)
- 
- CD\_Sol\_Ino  
= (Con\_SoInOrgan\*Caudal\_E)\*(1/1000)\*(1/1000)
- 
- CS\_CargaOrSuperf  
= IF(Modo\_Batch=0,(Q\_Caudal\_Entrad\*Ci\_Concen\_In)/Area\_Superficial,5.79)
- 
- Caudal\_E  
= RANDOM(Minn,Maxx)\*Q\_Caudal\_Entrad
- 
- Ci\_Conce\_In2  
= Ci\_Concen\_In\*ConvLitM3
- 
- Ci\_Concen\_In  
= 140
- 
- Co\_Concen\_Out  
= 20

---

○ Con\_SoInOrgan  
= Conce\_SoInOrgani\*ConvLitM3

---

↪ Conce\_SoInOrgani  
= 140

---

○ ConvLitM3  
= 1000/1

---

↪ Densidad  
= 1012.2

---

↪ Fluct  
= 0

---

↪ Flujo\_Biopelicul  
= Biopelicula

---

↪ Fs\_Factor\_Seguri  
= 5

---

↪ Grava  
= 1

---

↪ In\_BioP  
= Out\_SO\*Tasa\_Crec\_Bio\_SO+Plan\_Adultas\*Tasa\_Crec\_Bio\_Pl

---

↪ In\_Plan\_Adultas  
= IF(Plantulas-Retardo\_1<0,0,Retardo\_1)

---

↪ In\_Plantulas  
= Plantas\_Iniciale\*TS\_Crec\_Pla+TS\_Crec\_Pla\_BioP\*Biopelicula2

---

↪ In\_SO  
= VolSolidosOrga+Plantas\_Muertas\*TS\_Crec\_SolOrg\_P

---

☞ In\_SoInO  
= VolSolidosInOrga

---

Indice\_Biopelicu  
= Biopelicula2/Vol\_Util

---

Indice\_Plantas  
= Plantas/Vol\_Util

---

Indice\_Sol\_InOrg  
= Sol\_InOrg/Vol\_Util

---

Indice\_Sol\_Org  
= Sol\_Org/Vol\_Util

---

☞ Ka\_Const\_Elimina  
= 0.08

---

Largo  
= Area\_Superficial/Ancho

---

Maxx  
= 1+Fluct

---

Minn  
= 1-Fluct

---

☞ Modo\_Batch  
= 0


---

Numero\_Celdas  
= DllNumCeldas(Largo,Ancho,R\_Larg\_Anch\_Dese)


---

☞ Out\_Pla\_Adu  
= IF(Plan\_Adultas-Plan\_Adultas\*PV\_Plantas<0,0,Plan\_Adultas\*PV\_Plantas)


---

 Out\_SO  
= IF((Sol\_Org-Biopelícula2\*Tasa\_de\_Biodegra)>Plantas\_Muertas,Biopelícula2\*Tasa\_de\_Biodegra,0)

---

 PV\_Plantas  
= 0.05

---

 Plan\_Adultas  
= 0


---

Plantas  
= Plan\_Adultas+Plantas\_Muertas


---

Plantas\_Iniciales  
= PULSEIF(t=0,1,1)

---

 Plantas\_Muertas  
= 0

---

 Plantulas  
= 0

---

Porosidad

= IF((Porosidad\_Inicia-  
(Reduci\_Por\_Soln+Reduci\_Por\_SoOr+Reduci\_Biopelic+Reduci\_Plantas))>0,  
Porosidad\_Inicia-  
(Reduci\_Por\_Soln+Reduci\_Por\_SoOr+Reduci\_Biopelic+Reduci\_Plantas),0)

- 
- Porosidad\_Inicia  
= IF(Grava=0,30,IF(Grava=1,33,IF(Grava=2,37,IF(Grava=3,38,IF(Grava=4,40,0))))))
- 
- Q\_Caudal\_Entrad  
= 200
- 
- R\_Larg\_Anch\_Dese  
= 1
- 
- R\_Largo\_Ancho\_Ce  
= Largo/AnchoXCelda
- 
- Reducci\_Biopelic  
= INTSPLINE(2,0,0.1,0,6,11,17,20,21,22,25,31,38,40)
- 
- Reducci\_Plantas  
= INTSPLINE(2,0,0.1,0,2,4,6,8,9,11,12,28,30,40)
- 
- Reducci\_Por\_SoIn  
= INTSPLINE(2,0,0.1,0,6,11,17,20,21,22,25,31,38,40)
- 
- Reducci\_Por\_SoOr  
= INTSPLINE(2,0,0.1,0,6,11,17,20,21,22,25,31,38,40)
- 
- Retardo\_1  
= RETARDO(In\_Plantulas, 3, 2, 0) RETARDO(fuente de datos, tiempo de ajuste, orden, valor inicial)
- 
- Sol\_InOrg  
= 0
- 
- Sol\_Org  
= 0
- 
- TS\_Crec\_Pla  
= 0.005

---

⊖ TS\_Crec\_Pla\_BioP  
= 0.09

---

⊖ TS\_Crec\_SolOrg\_P  
= 0.01

---

⊖ Tasa\_Crec\_Bio\_Pl  
= 0.05

---

⊖ Tasa\_Crec\_Bio\_SO  
= 0.08

---

⊖ Tasa\_de\_Biodegra  
= 0.013

---

○ TiempoSimulacion  
= t

---

○ Vida\_Util  
= If(Porosidad<0.001,TiempoSimulacion,0)

---

○ VolSolidosInOrga  
= (CD\_Sol\_Ino/Densidad)\*(30/1)

---

○ VolSolidosOrga  
= (CD\_SolOr/Densidad)\*(30/1)

---

○ Vol\_Util  
= Volumen\*(Porosidad\_Inicia/100)

---

○ Volumen  
= Largo\*Ancho\*h\_Profundidad

---

⊖ h\_Profundidad  
= 0.3

---

○ ks\_Con\_Hidra  
= IF(Grava=0,550,IF(Grava=1,3000,IF(Grava=2,5500,IF(Grava=3,30000,IF(Grava=4,150000,0))))))

---

⊖ m\_Pendiente  
= 0.01

## ANEXO C. DOCUMENTACIÓN ELEMENTOS DEL MODELO

Con el fin de facilitar la comprensión de los diagramas de flujos y niveles, se ha segmentado el modelo en cinco sectores que agrupan los principales componentes de la dinámica básica del fenómeno. A continuación se presenta la documentación de todos los elementos del modelo, (parámetros, variables, flujos, niveles, clones, multiplicadores y retardos) ordenados por sectores y subsectores.

### SECTOR 1. FACTORES DE DISEÑO

Contiene los parámetros principales a tener en cuenta en el momento de construir un HCFSSH. Este sector cuenta con cuatro subsectores:

- 1.1 Configuración Inicial
- 1.2 Configuración recomendada HCFSSH.
- 1.3 Caudal de Entrada
- 1.4 Diseño

#### Subsector 1.1 Configuración Inicial

**Nombre:** Q\_Caudal\_Entrad (Caudal de Entrada)

**Tipo:** Parámetro

**Unidades:**  $\frac{m^3}{\text{día}}$  (Metros Cúbicos por día)

**Descripción:** También recibe el nombre de “afluente del Humedal”, Los HCFSSH están en la capacidad de depurar aguas residuales para comunidades de hasta 2000 habitantes, en promedio un habitante consume 104 litros por día [1], es decir que el consumo promedio para una población de 2000 habitantes es de 208000 Litros / 208  $m^3$

**Referencia:** García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal

**Límites:**  $20 \frac{m^3}{día} - 208 \frac{m^3}{día}$

1] **Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.** Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico. RAS Definición del nivel de complejidad y evaluación de la población, la dotación y la demanda de agua.

**Nombre:** Ci\_Concen\_In (Concentración inicial del contaminante)

**Tipo:** Parámetro

**Unidades:**  $\frac{mg}{lt}$  (Miligramos por Litro)

**Descripción:** Se determina con estudios de caracterización del afluente.

**Referencia:** García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal

**Límites:**  $140 \frac{mg}{lt} - 300 \frac{mg}{lt}$

**Nombre:** Co\_Concen\_Out (Concentración del contaminante en el efluente)

**Tipo:** Parámetro

**Unidades:**  $\frac{mg}{lt}$  (Miligramos por Litro)

**Descripción:** Determina la calidad final del agua, se fija según el límite de calidad ambiental. Para este caso deberá tener un valor máximo de 90 mg/L O<sub>2</sub>. [2]

**Referencia:** García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal

**Límites:**  $10 \frac{mg}{lt} - 90 \frac{mg}{lt}$

2] **Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.** Resolución 0631 Marzo 17 de 2015

**Nombre:** Grava

**Tipo:** Parámetro

**Unidades:** (Adimensional)

**Descripción:** Elemento para elegir el tipo grava de la siguiente forma:

Grava=0, Corresponde a Arenas graduadas

Grava=1, Corresponde a Arenas gravosas

Grava=2, Corresponde a Gravas finas

Grava=3, Corresponde a Gravas medianas

Grava=4, Corresponde a Rocas Pequeñas

**Límite** de 0 a 4, cada número tiene asociado un tipo de grava

**Referencia:** García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal

**Nombre:** Conce\_SolnOrgani (Concentración de Sólidos Inorgánicos)

**Tipo:** Parámetro

**Unidades:**  $\frac{mg}{lt}$  (Miligramos por Litro).

**Descripción:** Se determina con estudios de caracterización del afluente.

**Referencia:** García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal

**Límites:**  $100 \frac{mg}{lt} - 300 \frac{mg}{lt}$

### Subsector 1.2 Configuración recomendada HCFSSH

**Nombre:** Ka\_Const\_Elimina (Constante cinética de primer orden)

**Tipo:** Parámetro

**Ecuación:** Ka\_Const\_Elimina =0.8

**Unidades:** m/día (Metros por día)

**Descripción:** Esta constante varía según el contaminante que se quiera tratar, como se desea potenciar la eliminación de DBO, entonces tiene un valor fijo de 0.08 m/d

**Referencia:** García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal

**Nombre:** Fs\_Factor\_Seguri (Factor de seguridad)

**Tipo:** Parámetro

**Ecuación:** Fs\_Factor\_Seguri=5

**Unidades:** (Adimensional)

**Descripción:** Se define a criterio del ingeniero, generalmente utilizan un factor de 5.

<p><b>Referencia:</b> García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal</p>
<p><b>Nombre:</b> m_Pendiente (Pendiente)</p> <p><b>Tipo:</b> Parámetro</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>m\_Pendiente=0.01</math></p> <p><b>Unidades:</b> (Adimensional)</p> <p><b>Descripción:</b> Se recomienda una pendiente del 1% por los costos de excavación, pero es un parámetro que un usuario experto podría ajustar dependiendo de la necesidad, 1% significa que por cada 100 metros de largo el humedal tendrá 1 metro de profundidad.</p> <p><b>Referencia:</b> García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal</p>
<p><b>Nombre:</b> h_Profundidad (Profundidad)</p> <p><b>Tipo:</b> : Parámetro</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>h\_Profundidad = 0.3</math></p> <p><b>Unidades:</b> m (Metros)</p> <p><b>Descripción:</b> Los autores de la Guía Práctica de Diseño, recomiendan una profundidad máxima de 0.3 m, de otro modo ya no se estaría trabajando con un humedal de flujo sub-superficial horizontal</p> <p><b>Referencia:</b> García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal</p>
<p><b>Subsector 1.3 Caudal Entrada</b></p>
<p><b>Nombre:</b> Minn (Porcentaje mínimo caudal de entrada)</p> <p><b>Tipo:</b> Variable</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>Minn = 1-Fluct</math></p> <p><b>Unidades:</b> (adimensional)</p> <p><b>Descripción:</b> Porcentaje Mínimo que puede tener el caudal de entrada.</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> Maxx (Porcentaje máximo caudal de entrada)</p>

<p><b>Tipo:</b> Variable</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>Maxx = 1 + Fluct</math></p> <p><b>Unidades:</b> (adimensional)</p> <p><b>Descripción:</b> Porcentaje Máximo que puede tener el caudal de entrada.</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> Fluct (Fluctuación Caudal de Entrada)</p> <p><b>Tipo:</b> Parámetro</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>Fluct = 0</math></p> <p><b>Unidades:</b> (adimensional)</p> <p><b>Descripción:</b> Expresar el cambio del flujo en porcentaje de 0% a 100% en unidad de tiempo.</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> Caudal_E (Caudal de entrada)</p> <p><b>Tipo:</b> Variable</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>Caudal\_Entrada = RANDOM(Minn, Maxx) * Q\_Caudal\_Entrad</math></p> <p><b>Unidades:</b> m<sup>3</sup>/mes (Metros Cúbicos por mes)</p> <p><b>Descripción:</b> Fluctuación mensual del caudal de entrada.</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto</p>
<p><b>Nombre:</b> Q_Caudal_Entrad (Clon del sector Factores de Diseño, Subsector Configuración Inicial).</p>
<p><b>Nombre:</b> Vida_Util (Clon del sector Factores de Diseño 2)</p>
<p><b>Nombre:</b> Area_Superficial (Clon del sector Factores de Diseño)</p>
<p><b>Nombre:</b> CS_CargaOrSuperf (Clon del sector Factores de Diseño)</p>
<p><b>Nombre:</b> Numero_Celdas (Clon del sector Factores de Diseño)</p>
<p><b>Nombre:</b> R_Largo_Ancho_Ce (Clon del sector Factores de Diseño)</p>
<p><b>Nombre:</b> Ancho (Clon del sector Factores de Diseño)</p>
<p><b>Nombre:</b> AnchoXCelda (Clon del sector Factores de Diseño)</p>

## Elementos del Sector 1. Factores de diseño

**Nombre:** CS\_CargaOrSuperf (Carga Orgánica Superficial)

**Tipo:** Variable

**Ecuación:** CS\_CargaOrSuperf =

IF(Modo\_Batch=0,(Q\_Caudal\_Entrad\*Ci\_Concen\_In)/Area\_Superficial,5.79)

**Unidades:** (g\*DBO)/(m<sup>2</sup>\*d)

**Descripción:** Se recomienda que la Carga Orgánica superficial sea mejor que 6 (g\*DBO/m<sup>2</sup>\*d), de esta forma el humedal tendrá una Buena distribución de carga orgánica, en caso contrario se pueden formar unas zonas más colmatadas que otras y crear cortocircuitos por donde circula el agua y no se tendría el tratamiento esperado.

**Referencia:** García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal

**Nombre:** Area\_Superficial

**Tipo:** Variable

**Ecuación:** Area\_Superficial =

IF(Modo\_Batch=0,(Q\_Caudal\_Entrad/Ka\_Const\_Elimina)\*LN(Ci\_Concen\_In/Co\_Concen\_Out),4869.77)

**Unidades:** m<sup>2</sup> (Metros Cuadrados)

**Descripción:** Es el área necesaria para depurar la cantidad de concentración entrante del contaminante según el límite de salida, se utiliza el caudal de entrada y la constante cinética de primer orden, para encontrar el valor óptimo, en caso de que el modo batch, este activo, toma el valor de 4869.77 m<sup>2</sup>, que es el área superficial óptima para el escenario base.

**Referencia:** García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal

**Nombre:** ks\_Con\_Hidra (Conductividad Hidráulica)

**Tipo:** Variable

**Ecuación:**  $ks\_Con\_Hidra =$

$IF(Grava=0,550,IF(Grava=1,3000,IF(Grava=2,5500,IF(Grava=3,30000,IF(Grava=4,150000,0))))))$

**Unidades:**  $m^3/(m^2 \cdot dia)$  (Metros Cúbicos sobre Metros Cuadrados por día)

**Descripción:** La conductividad hidráulica está asociada al tipo de grava utilizada de la siguiente forma:

Arenas graduadas >>  $550 m^3/(m^2 \cdot d)$

Arenas gravosas >>  $3000 m^3/(m^2 \cdot d)$

Gravas finas >>  $5500 m^3/(m^2 \cdot d)$

Gravas medianas >>  $30000 m^3/(m^2 \cdot d)$

Rocas Pequeñas >>  $150000 m^3/(m^2 \cdot d)$

**Referencia:** García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal

**Nombre:** Porosidad\_Inicia (Porosidad Inicial)

**Tipo:** Variable

**Ecuación:**  $Porosidad\_Inicia =$

$IF(Grava=0,30,IF(Grava=1,33,IF(Grava=2,37,IF(Grava=3,38,IF(Grava=4,40,0))))$   
)

**Unidades:** (Porcentaje)

**Descripción:** Cada tipo de grava tiene una porosidad característica asociada:

Arenas graduadas >> 30 %

Arenas gravosas >> 33 %

Gravas finas >> 37 %

Gravas medianas >> 38%

Rocas Pequeñas >> 40%

**Referencia:** García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal

**Nombre:** Area\_Transversal (Área Transversal)

**Tipo:** Variable

<p><b>Ecuación:</b> <math>Area\_Transversal = IF(Modo\_Batch=0,Q\_Caudal\_Entrad/((ks\_Con\_Hidra/Fs\_Factor\_Seguri)*m\_Pendiente),33.33)</math></p> <p><b>Unidades:</b> m<sup>2</sup> (Metros Cuadrados)</p> <p><b>Descripción:</b> Caudal de entrada sobre la división de la conductividad hidráulica entre el factor de seguridad multiplicado por la pendiente.</p> <p><b>Referencia:</b> García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal</p>
<p><b>Nombre:</b> Largo (Largo)</p> <p><b>Tipo:</b> Variable</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>Largo = Area\_Superficial/Ancho</math></p> <p><b>Unidades:</b> m (Metros)</p> <p><b>Descripción:</b> Largo total del sistema.</p> <p><b>Referencia:</b> García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal</p>
<p><b>Nombre:</b> Ancho (Ancho)</p> <p><b>Tipo:</b> Variable</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>Ancho = Area\_Transersal/h\_Profudidad</math></p> <p><b>Unidades:</b> m (Metros)</p> <p><b>Descripción:</b> Ancho total del sistema, si solo se contemplara una celda</p> <p><b>Referencia:</b> García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal</p>
<p><b>Nombre:</b> R_Largo_Anch_Dese</p> <p><b>Tipo:</b> Variable</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>R\_Largo\_Anch\_Dese = 1</math></p> <p><b>Unidades:</b> adimensional</p> <p><b>Descripción:</b> Relación Largo por Ancho deseada del sistema, acepta números enteros, si se desea que el humedal como mínimo tenga el doble de ancho que de largo, se debe colocar 2</p>

**Referencia:** García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal

**Nombre:** Numero\_Celdas (Número de celdas)

**Tipo:** Variable

**Ecuación:** Numero\_Celdas = DIINumCeldas(Largo,Ancho,)

**Unidades:** (Adimensional)

**Referencia:** García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal

**Descripción:** el número de celdas se calcula teniendo en cuenta la relación Largo / Ancho, dado que el humedal debe ser más largo que ancho, si la relación Largo/Ancho < 1 entonces se debe dividir el ancho entre la cantidad de celdas necesarias para cumplir con esta condición, dado que para resolver esta situación se necesita un bucle while se vio la necesidad de programarlo y agregarlo a evolución como una función personalizada utilizando un dll, a continuación se presenta el código del dll utilizado.

```
1. Function DIINumCeldas(Parametros: array of Extended):Extended;
2.
3. Var l:integer; a:integer; c:integer;
4. begin
5. l:=Round(Parametros[0]);
6. a:=Round(Parametros[1]);
7. r:=Round(Parametros[2]);
8. c:=1;
9. if(l/a>1) THEN c:=1 else
10. while l/(a/c)<r do
11. begin
12. c:=c+1;
13. end;
14. Result:=c;
15. end;
16. exports DIINumCeldas;
```

En donde los parámetros de entrada son:

1. Parametros[0]:= Largo
2. Parametros[1]:= Ancho
3. Parametros[2]:= Relación

Y el resultado es el número de celdas del humedal.

**Nombre:** AnchoXCelda (Ancho por Celda)

**Tipo:** Variable

**Ecuación:**  $\text{AnchoXCelda} = \text{Ancho} / \text{Numero\_Celdas}$

**Unidades:** m (Metros)

**Descripción:** Se divide el ancho total del sistema entre el número de celdas para encontrar el ancho que debe tener cada celda.

**Referencia:** García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal

**Nombre:** R\_Largo\_Ancho\_Ce (Relación de Largo por Ancho obtenida)

**Tipo:** Variable

**Ecuación:**  $R\_Largo\_Ancho\_Ce = \text{Largo} / \text{AnchoXCelda}$

**Unidades:** m (Metros)

**Descripción:** Se requiere que la relación Largo / Ancho sea mayor a 1, dado que el humedal debe ser más largo que ancho.

**Referencia:** García, J., Corzo, A., (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal

## SECTOR 2. INTERACCIÓN SÓLIDOS INORGÁNICOS

**Representa la dinámica de la interacción de los sólidos inorgánicos.**

**Nombre:** In\_SolnO (Flujo de entrada Sólidos Inorgánicos).

**Tipo:** Flujo

**Ecuación:**  $In\_SolnO = VolSolidosInOrga$

**Unidades:** m<sup>3</sup>/mes (Metros cúbicos por mes)

**Descripción:** Ingresa el volumen que se va acumulando en el humedal mes a mes

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** Sol\_InOrg (Sólidos Inorgánicos)

**Tipo:** Nivel

**Ecuación:**  $Sol\_InOrg = 0$

**Unidades:** m<sup>3</sup> (Metros cúbicos)

**Descripción:** Volumen ocupado por la Acumulación de Sólidos Inorgánicos. Estos sólidos se van acumulando en el humedal, pues no se degradan fácilmente.

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** CD\_Sol\_Ino (Carga diaria de solidos Inorgánicos)

**Tipo:** Variable

**Ecuación:**  $CD\_Sol\_Ino = (Con\_SolnOrgan * Caudal\_E) * (1/1000) * (1/1000)$

**Unidades:** kg/dia (Kilogramos por día)

**Descripción:**  $(m^3/dia)(mg/m^3) = mg/dia * (1 g/1000 mg) * (1Kg/1000 gr)$

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** Densidad (Densidad de los sólidos)

**Tipo:** Parámetro

**Ecuación:**  $Densidad = 1030.0$

**Unidades:** kg/m<sup>3</sup> (Kilogramos por Metro Cúbico)

**Descripción:** Se toma como referencia la densidad de los sólidos de fangos activos 1030,2 Kg/m<sup>3</sup>.

## SECTOR 2. INTERACCIÓN SÓLIDOS INORGÁNICOS

**Referencia:** A. Pallares, P. Francois, M.-N. Pons and P. Schmitt. Suspended particles in wastewater: their optical, sedimentation and acoustical characterization and modeling. Water Science & Technology 63.2, 2011.

**Nombre:** Con\_SolnOrgan (Concentración de sólidos inorgánicos)

**Tipo:** Variable

**Ecuación:**  $Con\_SolnOrgan = Conce\_SolnOrgani * ConvLitM3$

**Unidades:**  $mg/m^3$  (Miligramos por Metro cúbico)

**Descripción:**  $(mg/dm^3)(1000 dm^3/m^3) = (mg/m^3)$

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** ConvLitM3 (Conversión de Litros a metros cúbicos)

**Tipo:** Variable

**Ecuación:**  $ConvLitM3 = 1000/1$

**Unidades:**  $dm^3/m^3$  (decímetros por metro cúbico)

**Descripción:**  $[1000 l \leftrightarrow 1 m^3]$   $[1000 dm^3 \leftrightarrow 1 m^3]$  conversión de litros o decímetros cúbicos a metros cúbicos.

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** Caudal\_Entrada (Clon del sector Factores de Diseño 2, Sub-sector Caudal\_Entrada)

**Nombre:** Conce\_SolnOrgani (Clon del sector Factores de Diseño, Sub-sector Configuración Inicial)

### SECTOR 3. INTERACCIÓN SÓLIDOS INORGÁNICOS - BIOPELÍCULA – PLANTAS

<p><b>Nombre:</b> In_SO Flujo de entrada a los sólidos orgánicos</p> <p><b>Tipo:</b> Flujo</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>In\_SO = VolSolidosOrga + Plantas\_Muertas * TS\_Crec\_SolOrg\_P</math></p> <p><b>Unidades:</b> m<sup>3</sup>/mes (Metros cúbicos por mes)</p> <p><b>Descripción:</b> Volumen de sólidos Orgánicos mensuales por efecto del caudal de entrada y las raíces Muertas.</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> Sol_Org ( Sólidos Orgánicos)</p> <p><b>Tipo:</b> Nivel</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>Sol\_Org = 0</math></p> <p><b>Unidades:</b> m<sup>3</sup> (Metros cúbicos)</p> <p><b>Descripción:</b> Volumen ocupado por la acumulación de Sólidos Orgánicos.</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> Out_SO (Flujo de Salida de los sólidos Orgánicos)</p> <p><b>Tipo:</b> Flujo</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>Out\_SO = IF((Sol\_Org - Biopelicula2 * Tasa\_de\_Biodegra) &gt; Plantas\_Muertas, Biopelicula2 * Tasa\_de\_Biodegra, 0)</math></p> <p><b>Unidades:</b> m<sup>3</sup>/mes (Metros cúbicos por mes)</p> <p><b>Descripción:</b> Se asegura que permanezca la cantidad de las plantas muertas.</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> VolSolidosOrga (Volumen de sólidos Orgánicos)</p> <p><b>Tipo:</b> Variable</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>VolSolidosOrga = (CD\_SolOr / Densidad) * (30 / 1)</math></p> <p><b>Unidades:</b> m<sup>3</sup>/mes (metro cúbico por mes)</p> <p><b>Descripción:</b> <math>V = m / d (Kg/día) / (Kg/m^3) = (m^3/día) (30 dia/mes)</math></p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> Ci_Conce_In2 (Concentración de sólidos Orgánicos)</p>

### SECTOR 3. INTERACCIÓN SÓLIDOS INORGÁNICOS - BIOPELÍCULA – PLANTAS

<p><b>Tipo:</b> Variable</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>Ci\_Conce\_In2 = Ci\_Concen\_In * ConvLitM^3</math></p> <p><b>Unidades:</b> mg/m<sup>3</sup> (Miligramos por Metro cúbico)</p> <p><b>Descripción:</b> <math>(mg/dm^3)(1000 dm^3/m^3)=(mg/m^3)</math></p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> TS_Crec_SolOrg_P (Tasa de crecimiento de los sólidos Orgánicos por efecto de las plantas)</p> <p><b>Tipo:</b> Parámetro</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>TS\_Crec\_SolOrg\_P = 0.01</math></p> <p><b>Unidades:</b> (adimensional)</p> <p><b>Descripción:</b> Cuando las raíces mueren, estas se convierten a sólidos orgánicos.</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> Tasa_de_Biodegra ( Tasa de Biodegradación)</p> <p><b>Tipo:</b> Parámetro</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>Tasa\_de\_Biodegra=0.013</math></p> <p><b>Unidades:</b> (adimensional)</p> <p><b>Descripción:</b> Tasa con la cual se degradan los sólidos orgánicos por efecto de las bacterias presentes en la biopelícula.</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> Biopelícula2 (Biopelícula total en el modelo)</p> <p><b>Tipo:</b> Nivel</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>Biopelícula2 = 1</math></p> <p><b>Unidades:</b> m<sup>3</sup> (Metros cúbicos)</p> <p><b>Descripción:</b> Volumen ocupado por la acumulación de la Biopelícula.</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> Biopelícula</p> <p><b>Tipo:</b> Nivel</p>

### SECTOR 3. INTERACCIÓN SÓLIDOS INORGÁNICOS - BIOPELÍCULA – PLANTAS

**Ecuación:** Biopelícula =0

**Unidades:** m<sup>3</sup> (Metros Cúbicos)

**Descripción:** Volumen ocupado por la acumulación de la Biopelícula, corresponde a la biopelícula en el instante cero, esta requiere de un tiempo para crecer, es por esta razón que pasa al nivel Biopelícula 2.

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** In\_BioP (Flujo de entrada de la biopelícula)

**Tipo:** Flujo

**Ecuación:** In\_BioP =

Out\_SO\*Tasa\_Crec\_Bio\_SO+Plan\_Adultas\*Tasa\_Crec\_Bio\_PI

**Unidades:** m<sup>3</sup>/mes (Metros Cúbicos por mes)

**Descripción:** Crecimiento de la Biopelícula, la cual está limitada por los sólidos orgánicos, los cuales son alimento para esta población.

(Out\_SO\*Tasa\_Crec\_Bio\_SO)

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** Tasa\_Crec\_Bio\_PI (Tasa de crecimiento de la biopelícula por efecto de las plantas adultas)

**Tipo:** Parámetro

**Ecuación:** Tasa\_Crec\_Bio\_PI =0.05

**Unidades:** (adimensiona)

**Descripción:** Tasa de crecimiento de la biopelícula por efecto de las Plantas Adultas, las plantas adultas ofrecen un área en la cual la biopelícula se adhiere.

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** Plan\_Adultas (Clon del sector Obstrucción Raíces Plantas)

**Nombre:** Plantas\_Muertas (Clon del sector Obstrucción Raíces Plantas)

**Nombre:** Densidad (Clon del sector Interacción sólidos inorgánicos)

**Nombre:** Caudal\_Entrada (Clon del sector Factores de Diseño 2, Sub-sector Caudal\_Entrada)

### SECTOR 3. INTERACCIÓN SÓLIDOS INORGÁNICOS - BIOPELÍCULA – PLANTAS

**Nombre:** ConvLitM<sup>3</sup> (Clon del sector Interacción sólidos orgánicos)

**Nombre:** Ci\_Concen\_In (Clon del sector Factores de Diseño, sub-sector Configuración Inicial)

### SECTOR 4. OBSTRUCCIÓN RAÍCES PLANTAS

**Nombre:** Plántulas

**Tipo:** Nivel

**Ecuación:** Plántulas =Plantas\_Inicial

**Unidades:** m<sup>3</sup> (metros cúbicos)

**Descripción:** las plantas iniciales no tienen un gran impacto en la colmatación del sistema

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** TS\_Crec\_Pla (Tasa de crecimiento de las plántulas)

**Tipo:** Parámetro

**Ecuación:** TS\_Crec\_Pla =0.013

**Unidades:** (adimensional)

**Descripción:** se simplifica el crecimiento de las plantas llevándolo a una tasa de crecimiento.

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** TS\_Crec\_Pla\_BioP Tasa de aumento de las plantas por efecto de la biopelícula

**Tipo:** Parámetro

**Ecuación:** TS\_Crec\_Pla\_BioP =0.09

**Unidades:** (adimensional)

**Descripción:** Las plantas absorben nutrientes transformados por la biopelícula.

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

#### SECTOR 4. OBSTRUCCIÓN RAÍCES PLANTAS

**Nombre:** Retardo\_1

**Tipo:** Retardo

**Ecuación:** Retardo\_1 = RETARDO(In\_Plantulas, 3, 2, 0)

**Unidades:** (adimensional)

**Descripción:** El crecimiento de las plantas no es inmediato, por eso se necesita utilizar el elemento retardo, el retardo tiene un tiempo de ajuste de 3 meses y es de orden 2.

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** In\_Plan\_Adultas (Flujo de entrada a las plantas adultas)

**Tipo:** Flujo

**Ecuación:** In\_Plan\_Adultas = IF(Plantulas-Retardo\_1<0,0,Retardo\_1)

**Unidades:** (m<sup>3</sup>/mes)

**Descripción:** ingresa el material que llega del retardo y lo lleva hacia plantas adultas, se implementa control para evitar que el nivel en algún instante tenga valores negativos

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** Plan\_Adultas (Plantas Adultas)

**Tipo:** Nivel

**Ecuación:** Plan\_Adultas = 0

**Unidades:** m<sup>3</sup> (Metros cúbicos)

**Descripción:** Acumulador del volumen de las plantas adultas, cuando las plantas son adultas, las raíces van muriendo, convirtiéndose en sólidos Orgánicos

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** Out\_Pla\_Adu (Flujo de salida de las plantas adultas)

**Tipo:** Flujo

**Ecuación:** Out\_Pla\_Adu = IF(Plan\_Adultas-Plan\_Adultas\*PV\_Plantas<0,0,Plan\_Adultas\*PV\_Plantas)

#### SECTOR 4. OBSTRUCCIÓN RAÍCES PLANTAS

**Unidades:** m<sup>3</sup>/mes (Metros Cúbicos por mes)

**Descripción:** Disminución del volumen de las plantas adultas

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** PV\_Plantas (Tasa de muertes de las plantas)

**Tipo:** Parámetro

**Ecuación:** Plan\_Adultas = 0.05

**Unidades:** (adimensional)

**Descripción:** Con el tiempo las plantas van muriendo, se define una tasa de muertes del 0.5%

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** Plantas\_Muertas

**Tipo:** Nivel

**Ecuación:** Plantas\_Muertas = 0

**Unidades:** m<sup>3</sup>

**Descripción:** volumen de las plantas muertas del humedal.

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** Plantas\_Inicial

**Tipo:** Variable

**Ecuación:** PULSEIF(t=0,1,1)

**Unidades:** m<sup>3</sup>

**Descripción:** Volumen total que ocupan las plántulas [Unidades (Metros Cúbicos)]

En el instante de tiempo 0, es decir cuando inicia la simulación, ingresa en el flujo el volumen ocupado por las plantas iniciales.

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** Biopelicula2 (Clon del sector Interacción Solidos Orgánicos - Biopelícula - Plantas)

## SECTOR 5. FACTORES DE DISEÑO 2

Calcula la reducción de la porosidad del sistema mes a mes, y obtiene la vida útil del mismo.

### Subsector 5.1 Porosidad

**Nombre:** Reducci\_Por\_Soln (Reducción porosidad por sólidos Inorgánicos)

**Tipo:** Multiplicador

**Ecuación:** Reducci\_Por\_Soln =  
INTSPLINE(2,0,0.1,0,6,11,17,20,21,22,25,31,38,40)

**Unidades:** (adimensional)

**Descripción:** Comportamiento de la reducción de la porosidad, según el volumen que ocupan los Sólidos Inorgánicos.

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

### Subsector 5.1 Porosidad

**Nombre:** Reducci\_Por\_SoOr (Reducción porosidad por sólidos Orgánicos)

**Tipo:** Multiplicador

**Ecuación:** Reducci\_Por\_SoOr =  
INTSPLINE(2,0,0.1,0,6,11,17,20,21,22,25,31,38,40)

**Unidades:** (adimensional)

**Descripción:** Comportamiento de la reducción de la porosidad, según el volumen que ocupan los Sólidos Orgánicos.

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

**Nombre:** Reducci\_Biopelic (Reducción porosidad por Biopelícula)

**Tipo:** Multiplicador

**Ecuación:** Reducci\_Biopelic =  
INTSPLINE(2,0,0.1,0,6,11,17,20,21,22,25,31,38,40)

**Unidades:** (adimensional)

**Descripción:** Comportamiento de la reducción de la porosidad, según el volumen que ocupa la biopelícula.

**Referencia:** Criterio del modelador y/o experto.

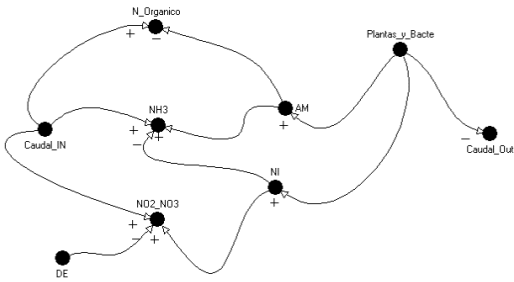
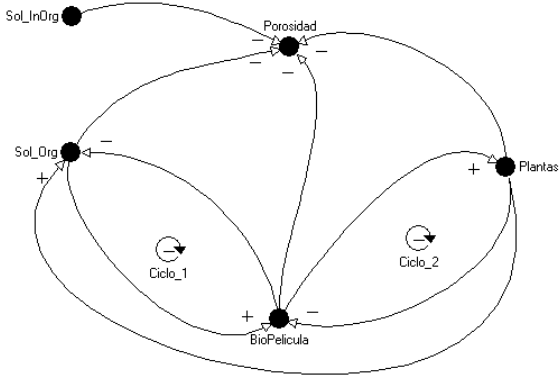
<p><b>Nombre:</b> Porosidad (Porosidad)</p> <p><b>Tipo:</b> Variable</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>Porosidad = IF((Porosidad\_Inicia - (Reduci\_Por\_Soln + Reduci\_Por\_SoOr + Reduci\_Biopelic + Reduci\_Plantas)) &gt; 0, Porosidad\_Inicia - (Reduci\_Por\_Soln + Reduci\_Por\_SoOr + Reduci\_Biopelic + Reduci\_Plantas), 0)</math></p> <p><b>Unidades:</b> (Porcentaje)</p> <p><b>Descripción:</b> La porosidad se ve disminuida con el paso del tiempo, por efecto de los diferentes factores que intervienen, la estructura se asegura para que no den valores negativos.</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> Porosidad_Inicia (Clon del sector Factores de Diseño)</p>
<p><b>Elementos del Sector 5. Factores de Diseño 2</b></p>
<p><b>Nombre:</b> Vol_Util (Volumen Útil de sistema)</p> <p><b>Tipo:</b> Variable</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>Vol\_Util = Volumen * (Porosidad\_Inicia / 100)</math></p> <p><b>Unidades:</b> m<sup>3</sup> (Metros Cúbicos)</p> <p><b>Descripción:</b> Es el volumen total del sistema multiplicado por la porosidad del material granular</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> Indice_Sol_InOrg (Índice de Sólidos Inorgánicos)</p> <p><b>Tipo:</b> Variable</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>Indice\_Sol\_InOrg = Sol\_InOrg / Vol\_Util</math></p> <p><b>Unidades:</b> (adimensional)</p> <p><b>Descripción:</b> El máximo volumen que pueden ocupar los sólidos Inorgánicos está dado por el parámetro Vol_Util, es decir que los valores que se esperan de la ecuación van de 0 a 1.</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> Indice_Plantas (índice de plantas)</p>

<p><b>Tipo:</b> Variable</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>\text{Indice\_Plantas} = \text{Plantas}/\text{Vol\_Util}</math></p> <p><b>Unidades:</b> (adimensional)</p> <p><b>Descripción:</b> El máximo volumen que pueden ocupar las plantas está dado por el parámetro Vol_Util, es decir que los valores que se esperan de la ecuación van de 0 a 1.</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> Vida_Util (Vida Útil)</p> <p><b>Tipo:</b> Variable</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>\text{Vida\_Util} = \text{If}(\text{Porosidad} &lt; 0.01, \text{TiempoSimulacion}, 0)</math></p> <p><b>Unidades:</b> mes (Meses)</p> <p><b>Descripción:</b> Bajo el escenario simulado, el humedal tendrá la vida útil de la ecuación. (La vida útil es el tiempo de simulación que el humedal tarda en llegar a tener una porosidad de 0%)</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Elementos del Sector 5. Factores de Diseño 2</b></p>
<p><b>Nombre:</b> Indice_Sol_Org (Indice de Solidos Orgánicos)</p> <p><b>Tipo:</b> Variable</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>\text{Indice\_Sol\_Org} = \text{Sol\_Org}/\text{Vol\_Util}</math></p> <p><b>Unidades:</b> (adimensional)</p> <p><b>Descripción:</b> El máximo volumen que pueden ocupar los sólidos orgánicos está dado por el parámetro Vol_Util, es decir que los valores que se esperan de la ecuación van de 0 a 1.</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> Indice_Biopelicu (Indice de Biopelícula)</p> <p><b>Tipo:</b> Variable</p> <p><b>Ecuación:</b> <math>\text{Indice\_Biopelicu} = \text{Biopelicula2}/\text{Vol\_Util}</math></p> <p><b>Unidades:</b> (adimensional)</p>

<p><b>Descripción:</b> La máxima cantidad de Biopelícula que se pueden acumular está determinado por el parámetro Vol_util, es decir que al hacer la operación, Biopelícula/Vol_util, obtendremos un valor entre 0 y 1.</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> Volumen (Volumen Total del sistema)</p> <p><b>Tipo:</b> Variable</p> <p><b>Ecuación:</b> Volumen = Largo*Ancho*h_Profundidad</p> <p><b>Unidades:</b> m<sup>3</sup> (Metros Cúbicos)</p> <p><b>Descripción:</b> Volumen total del humedal dado por las dimensiones geométricas de este.</p> <p><b>Referencia:</b> Criterio del modelador y/o experto.</p>
<p><b>Nombre:</b> Sol_InOrg (Clon del sector Interacción Solidos Inorgánicos)</p>
<p><b>Nombre:</b> Largo (Clon del sector Factores de Diseño)</p>
<p><b>Nombre:</b> Ancho (Clon del sector Factores de Diseño)</p>
<p><b>Elementos del Sector 5.Factores de Diseño 2</b></p>
<p><b>Nombre:</b> Plantas (Clon del sector Obstrucción Raíces Plantas)</p>
<p><b>Nombre:</b> Sol_Org (Clon del sector Interacción solidos orgánicos - Biopelícula - Plantas )</p>
<p><b>Nombre:</b> Vol_Util (Clon del sector Factores de Diseño 2)</p>
<p><b>Nombre:</b> Biopelicula2 (Clon del sector Interacción solidos orgánicos - Biopelícula - Plantas)</p>

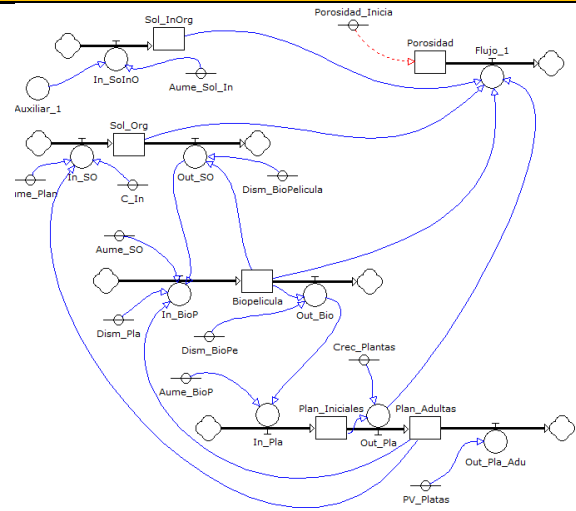
## ANEXO D. EVOLUCIÓN DEL MODELADO

Esta sección ofrece al lector una breve descripción de cada prototipo incluido en la carpeta prototipos de esta investigación, el objetivo fue llevar un seguimiento de la metodología utilizada resaltando los aspectos principales de cada prototipo, observando el crecimiento en complejidad y cobertura, se incluyen las versiones de prototipos más relevantes, reduciéndolas a 10 por prototipo acabado.

Cambio	Detalle
<b>Prototipo0.10.mev</b>	
<p>Diagrama de influencias, Modelando el fenómeno desde el punto de vista de la eliminación de Nitrógeno Orgánico, Amoniaco, Nitritos y Nitratos, los cuales son degradados por las plantas.</p>	
<b>Prototipo0.20.mev</b>	
<p>Se cambia el enfoque de modelado, desechando el prototipo anterior, dado que para este proyecto de grado se debe concentrar el esfuerzo de trabajo en el fenómeno de colmatación desde una hipótesis básica, dejando la posibilidad para que en otra investigación más profunda, se incluyan los procesos de eliminación de contaminantes dada su complejidad. Se define la hipótesis dinámica básica, expresada en diagramas de influencias en donde la colmatación es medida como la porosidad del sistema.</p>	

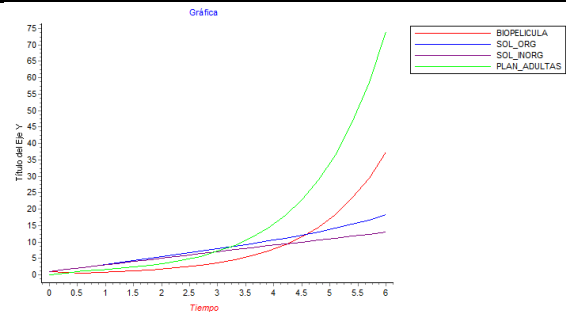
### Prototipo0.30.mev

Diagramas de flujos y niveles de la hipótesis dinámica básica, en donde la porosidad se modela como un nivel en el cual tras cada iteración va perdiendo porosidad por efecto de las plantas, Sólidos Orgánicos, Sólidos inorgánicos y Biopelícula, no hay distinción de sectores y algunas variables no cuentan con nombres apropiados.



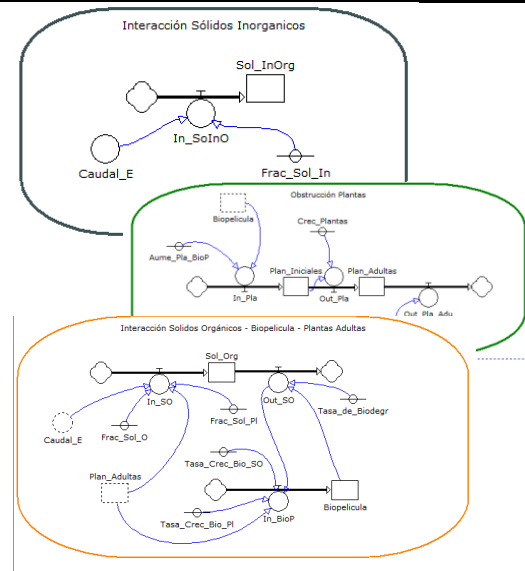
### Prototipo0.40.mev

El modelo se calibra para obtener el comportamiento de referencia suministrado por el ingeniero civil experto en el tema.



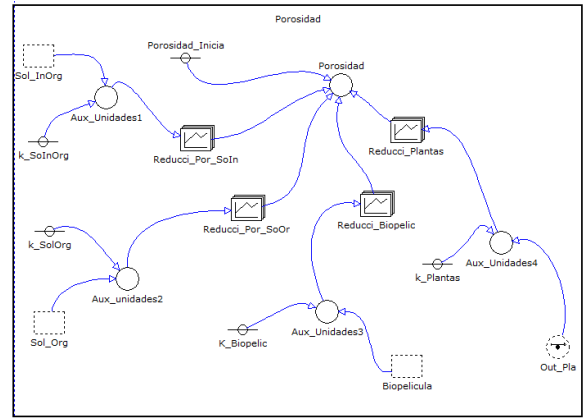
### Prototipo0.50.mev

- Se realiza la distinción de tres sectores principales: Interacción Sólidos Inorgánicos, Interacción Sólidos Orgánicos – Biopelícula – Plantas Adultas, Obstrucción plantas, identificados cada uno con un color y apoyado en el uso de Clones para que el modelo sea más fácil de leer.
- Se evalúa la necesidad de incluir multiplicadores para modelar la correspondencia de las variables principales con la porosidad.



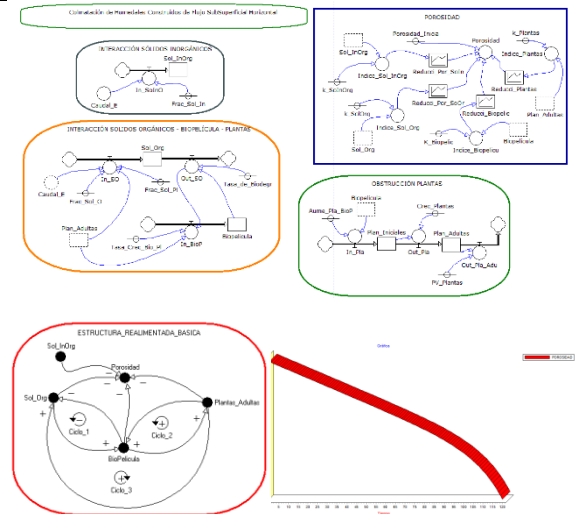
### Prototipo0.60.mev

- Se agrega el sector porosidad con el uso de multiplicadores para cada nivel principal.
- Se calibra el modelo respecto al modo de referencia.
- Contiene variables sin el nombre adecuado.
- Se cambia el modelado de la porosidad de un nivel a una variable, pues es un error considerarla como un nivel, puesto que en cada iteración se determina el valor real del sistema.



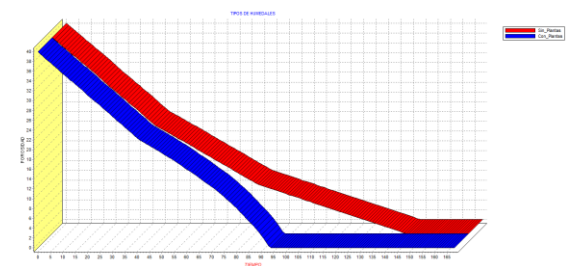
### Prototipo0.70.mev

- Se ordenan los elementos de una forma visualmente agradable para facilitar la lectura del modelo.
- Se identifica un tercer ciclo de realimentación.
- Todos los elementos contienen nombres apropiados.
- Se obtiene el comportamiento de la porosidad en el tiempo.



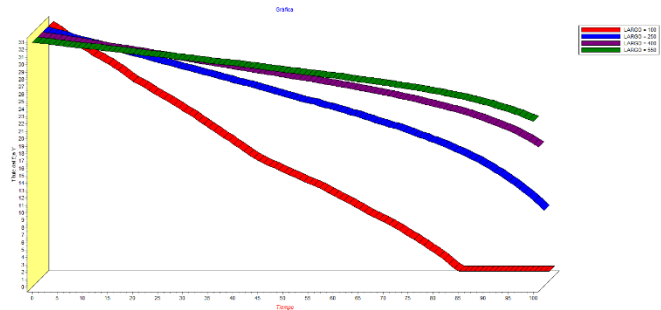
### Prototipo0.80.mev

- Se crean escenarios y se aplica análisis de sensibilidad por variación de escenarios.
  - Humedal con plantas
  - Humedal sin Plantas
  - Humedal sin Caudal
  - Modo de referencia



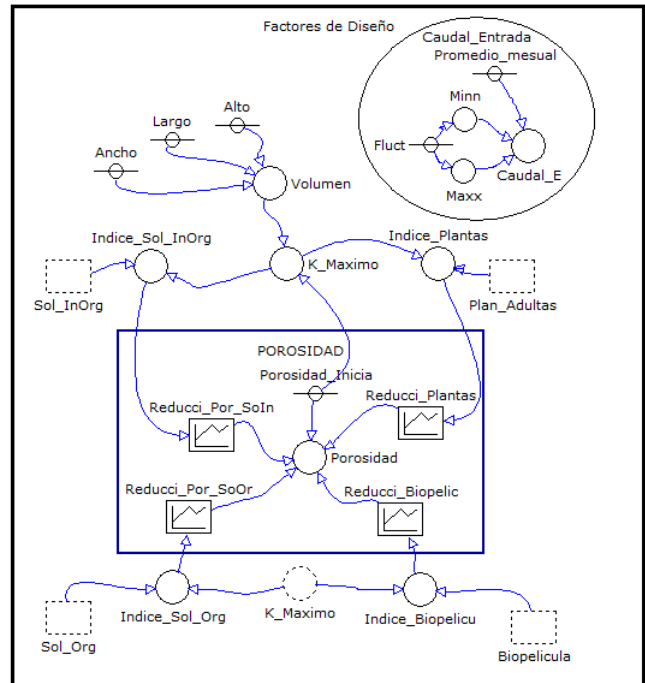
### Prototipo0.90.mev

Se realizan experimentos para observar el comportamiento de las variables utilizando análisis de sensibilidad con variación de parámetros.



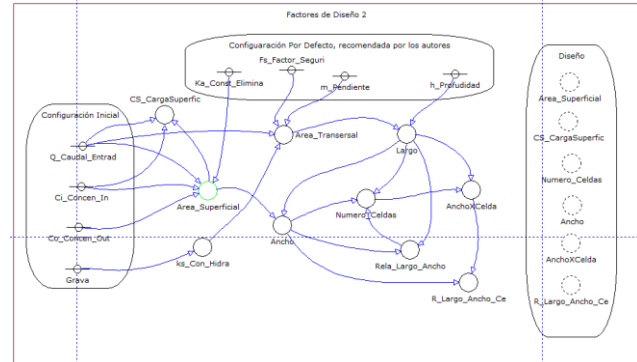
### Prototipo1.00.mev

- Se incorporan los factores de diseño a nivel macro teniendo en cuenta específicamente el volumen del sistema y el caudal de entrada, el caudal de entrada sufre una fluctuación, no es un flujo constante y puede variar dependiendo de la hora del día, en este caso la simulación se realiza en meses, por lo tanto, la variación de un mes a otro es mucho menor, esto se representa con una función Random que varía dependiendo de la fluctuación.
- El volumen se obtiene multiplicando las dimensiones del sistema, Largo, Ancho y Alto.



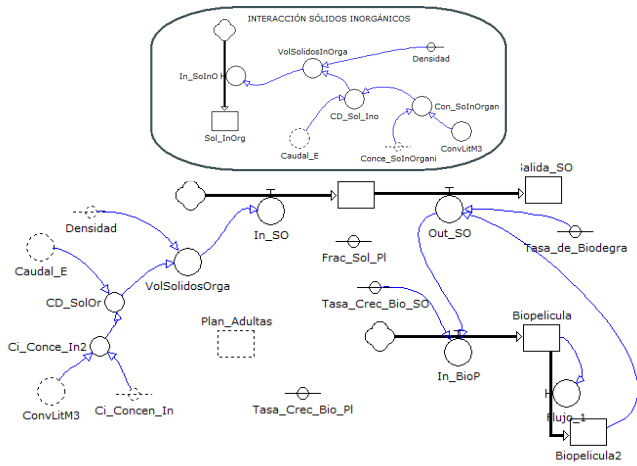
### Prototipo1.10.mev

- Se agregan los factores de diseño del libro García, J, Corzo, A, (2008). Diseño de Humedales de Flujo Horizontal, en donde se divide el sector en tres subsectores;
  - Configuración Inicial
  - Configuración por defecto
  - Diseño



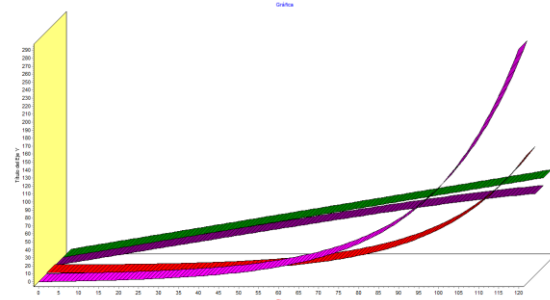
### Prototipo1.20.mev

- Al incluir los factores de diseño fue necesario replantear los demás sectores, esto con el fin de que hubiera consistencia dimensional entre todos los elementos, se cambia las unidades con que se trabaja, se utiliza la formula densidad es igual a masa sobre volumen para determinar el volumen de los factores principales.



### Prototipo1.30.mev

- Calibración del modelo a la luz del modo de referencia, integración de sectores sólidos Inorgánicos y solidos orgánicos, biopelícula y plantas con los factores de diseño de la interfaz 1, se agrega retardo de orden uno para la biopelícula.





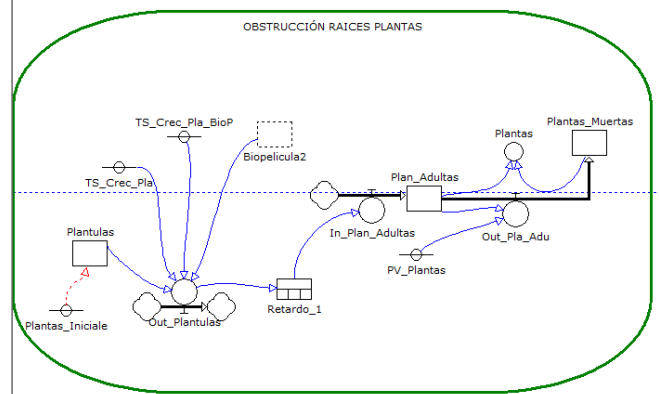
### Prototipo1.60.mev

- Se agrega dll; el número de celdas se calcula teniendo en cuenta la relación Largo / Ancho, dado que el humedal debe ser más largo que ancho, si la relación Largo/Ancho < 1 entonces se debe dividir el ancho entre la cantidad de celdas necesarias para cumplir con esta condición, dado que para resolver esta situación se necesita un bucle while se vio la necesidad de programarlo y agregarlo a evolución como una función personalizada utilizando un dll, a continuación se presenta el código del dll utilizado.

```
17. Function DIINumCeldas(Parametros: a
    rray of Extended):Extended;
18.
19. Var l:integer; a:integer; c:integer;
20. begin
21. l:=Round(Parametros[0]);
22. a:=Round(Parametros[1]);
23. c:=1;
24. if(l/a>1) THEN c:=1 else
25. while l/(a/c)<1 do
26. begin
27. c:=c+1;
28. end;
29. Result:=c;
30. end;
31. exports DIINumCeldas;
```

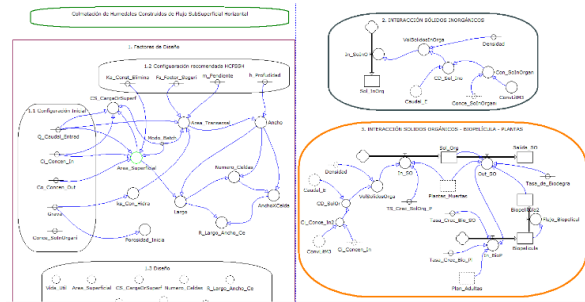
### Prototipo1.70.mev

- Se agregan un retardo de información cuando las plantas iniciales, pasan de ser plántulas a ser plantas adultas.
- Se crea condición para que solo muestre la vida útil cuando le queda al humedal 0% de porosidad, de esta forma se gana mayor precisión para obtener el tiempo que el humedal funciona en óptimas condiciones



## Prototipo1.80.mev

- Se reordenan los sectores del modelo.
- Se realiza modificaciones en los sectores de estos.
- Calibración del modelo.
- Escenario          Modo          Batch  
agregado



## Prototipo1.90.mev

- Modificación del dll para obtener el número de celdas:

**32. Function DIINumCeldas(Parametros: array of Extended): Extended;**

**33.**

**34. Var l:integer; a:integer; c:integer;**

**35. begin**

**36. l:=Round(Parametros[0]);**

**37. a:=Round(Parametros[1]);**

**38. r:=Round(Parametros[2]);**

**39. c:=1;**

**40. if(l/a>1) THEN c:=1 else**

**41. while l/(a/c)<r do**

**42. begin**

**43. c:=c+1;**

**44. end;**

**45. Result:=c;**

**46. end;**

**47. exports DIINumCeldas;**

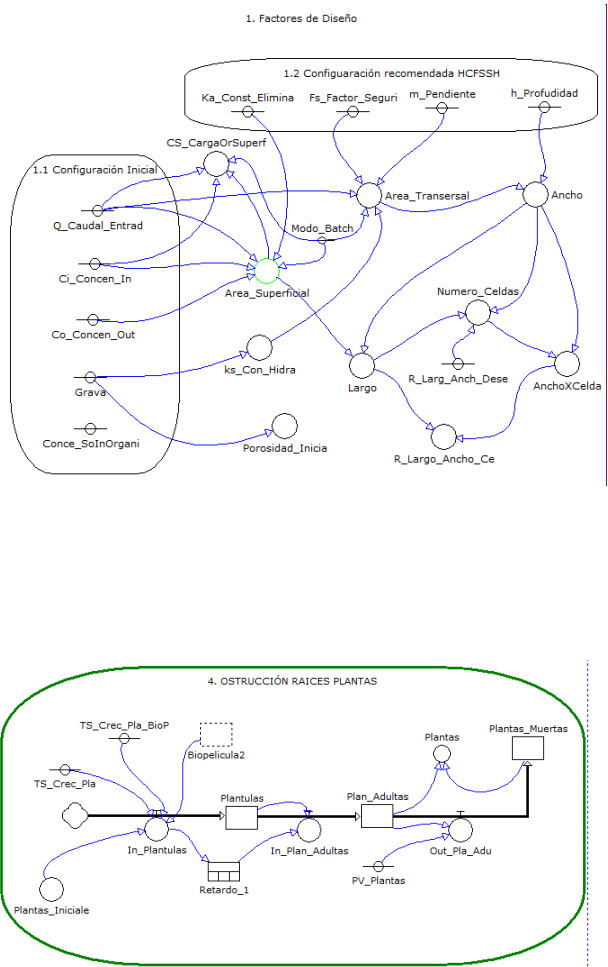
En donde los parámetros de entrada son:

**4. Parametros[0]:= Largo**

**5. Parametros[1]:= Ancho**

**6. Parametros[2]:= Relacion**

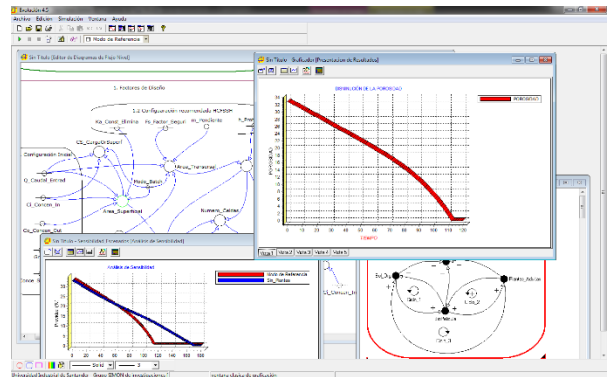
- Se incluye parámetro R\_Largo\_Anch\_Dese
- Ajuste representación retardos del crecimiento de las plantas
- Reorganización sub-sectores



## Prototipo2.00.mev

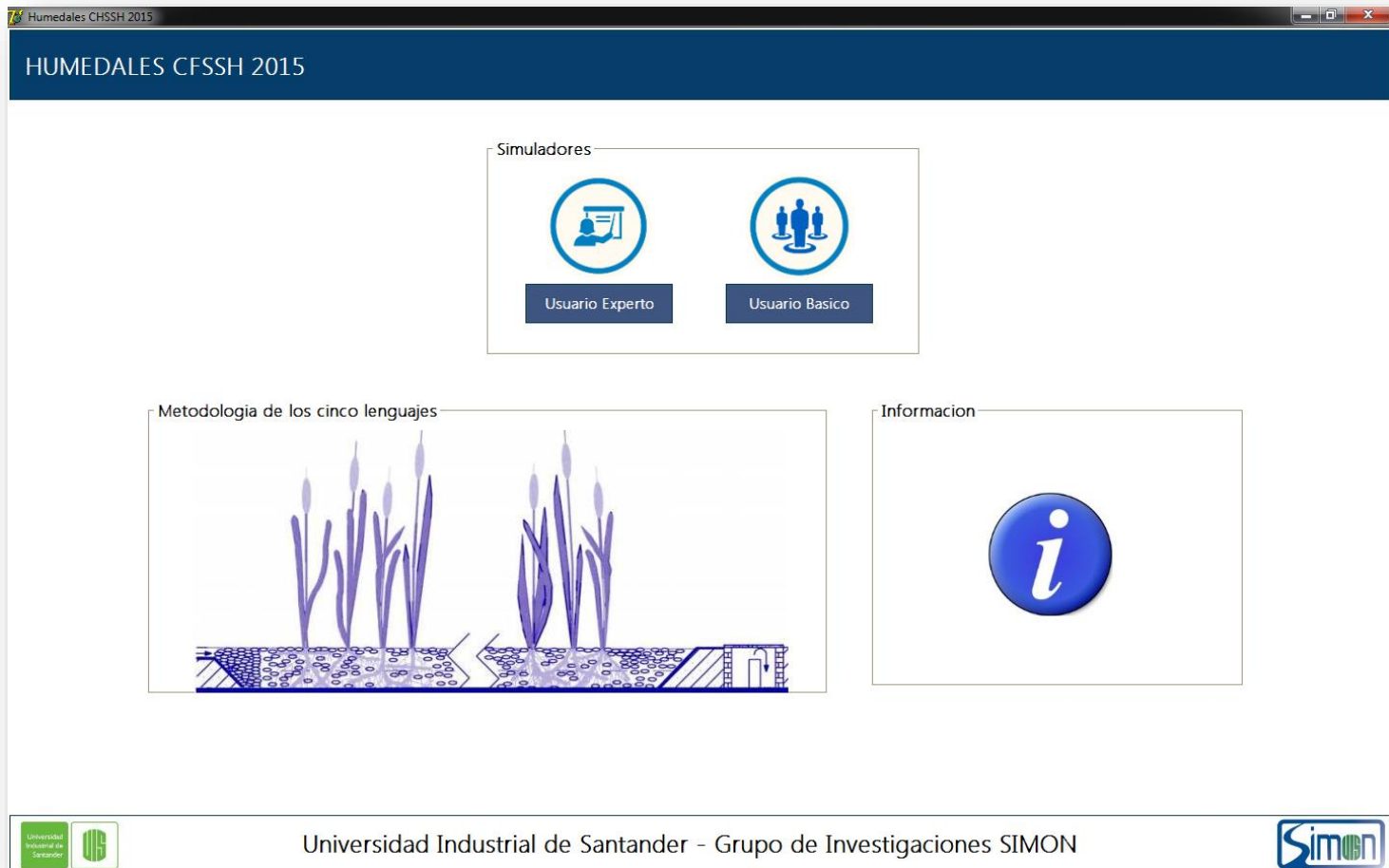
Modificación de la densidad de los sólidos, pasando de un valor de  $10,12 \text{ kg/m}^3$  a  $10,30 \text{ kg/m}^3$ , teniendo en cuenta que inicialmente este valor había sido aproximado por el investigador y luego fue hallado en una publicación de la revista Water science & technology.

Corresponde al prototipo final utilizado para la elaboración de los experimentos.

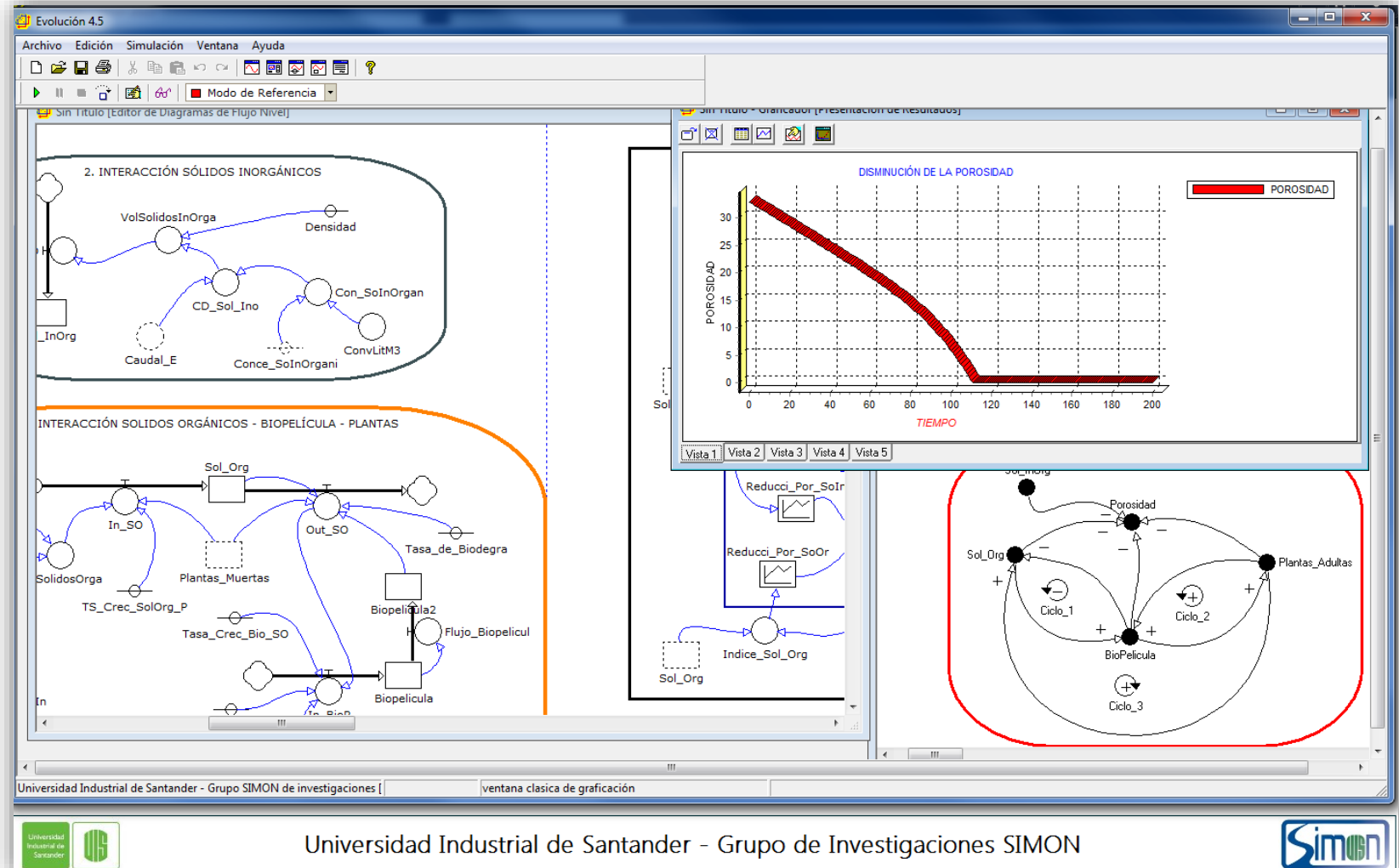


## ANEXO E. INTERFACES AMBIENTE SOFTWARE HUMEDALES CFSSH 2015

Pantalla principal Humedales CFSSH 2015



## Interfaz Usuario Experto



## Interfaz Usuario Básico

Humedales CHSSH 2015

### HUMEDALES CFSSH 2015

Usuario Básico

Abrir Guardar

**Parámetros**

Caudal Entrada   $m^3/d$

Concentración Ci  mg/Lt

Concentración Co  mg/Lt

Concentración Si  mg/Lt

Tipo de Grava

Tiempo de simulación [Meses]

Iniciar

Pausa

Detener

Vida útil  
110.30  
Meses

TEMPO (Meses)	POROSIDAD (%)
0	30
10	28
20	25
30	22
40	19
50	16
60	13
70	10
80	7
90	4
100	1
110.30	0

**Factores de Diseño**

**Dimensionamiento Biológico**

Area Superficial [ $m^2$ ] 4743.16

Carga Superficial [ $\frac{g*DBO}{m^2*d}$ ] 5.76

**Dimensionamiento Hidráulico**

Número de celdas 3 Ancho [ $m$ ] 36.11

Relación Largo/Ancho 1.21 Largo [ $m$ ] 43.78

Universidad Industrial de Santander

Universidad Industrial de Santander - Grupo de Investigaciones SIMON

## Metodología de los cinco lenguajes

Humedales CHSSH 2015

### HUMEDALES CFSSH 2015

Metodología de los cinco lenguajes

The diagram illustrates the methodology of the five languages, centered around five main components, each represented by an icon in a circle and a corresponding text box:

- Prosa**: Represented by an icon of a document and a pen.
- Diagrama de Influencias**: Represented by an icon of a person pointing to a graph.
- Flujos y Niveles**: Represented by an icon of a presentation screen with a clock.
- Ecuaciones**: Represented by an icon of a stack of papers.
- Comportamiento**: Represented by an icon of a laptop displaying a graph.

Below these components is a separate box labeled **Pruebas de evaluación del modelo**.

Universidad Industrial de Santander - Grupo de Investigaciones SIMON

## Comportamiento

Humedales CHSSH 2015

### HUMEDALES CFSSH 2015

Abrir Guardar

Comportamiento

Parámetros

Caudal Entrada   $m^3/d$

Concentración Ci  mg/Lt

Concentración Co  mg/Lt

Concentración SI  mg/Lt

Tipo de Grava

Tiempo de simulación [Meses]

Iniciar Pausa Detener

Vida útil 110.90 Meses

Vida útil Plantas Biopelícula Sólidos Orgánicos Sólidos Inorgánicos

Volumen ocupado por la Biopelícula

TIEMPO (Meses)	Volumen (Metros cúbicos)
0	0
10	0.5
20	1.5
30	3.0
40	5.5
50	10.0
60	18.0
70	30.0
80	45.0
90	60.0
100	75.0
110	90.0

Factores de Diseño

Dimensionamiento Biológico

Area Superficial [ $m^2$ ] 4932.51

Carga Superficial [ $\frac{g*DBO}{m^2*d}$ ] 5.90

Dimensionamiento Hidráulico

Número de celdas 3 Ancho [ $m$ ] 38.52

Relación Largo/Ancho 1.11 Largo [ $m$ ] 42.69


Universidad Industrial de Santander

Simon

# Información


Información

**Autores**




German Ramírez    Hugo Andrade    Angélica Corzo

**Acerca de**



Modelo    Ambiente Software

**Agradecimientos**



Universidad Industrial de Santander  
CONSTRUIMOS FUTURO

Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática - UIS

ESCUELA DE INGENIERIA *Civil*

XII CONGRESO LATINOAMERICANO DE DINÁMICA DE SISTEMAS