

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARAMÉTRICA PARA EL DISEÑO  
EFICIENTE DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO  
SUPERFICIAL A TRAVÉS DEL SOFTWARE MATLAB**

**Tesis para optar por el título profesional de Ingeniero Civil**

**AUTOR:**

Raúl Sebastian Acuña Letona

**ASESOR:**

Federico Alexis Dueñas Dávila

Lima, diciembre del 2020

En el presente trabajo se desarrolló un aplicativo con ayuda del software **MATLAB** para acompañar en las fases de diseño y mantenimiento de la implementación de proyectos de humedales artificiales de flujo superficial. Dicho aplicativo se encuentra de manera libre para su descarga con el nombre **HumePUCP** en el siguiente link: <https://bit.ly/3k2hOs7>.

El trabajo de tesis propone un primer acercamiento para un diseño optimizado de humedales artificiales en función a la literatura existente. Por un lado, existen diversos autores que proponen distintas ecuaciones de diseño en función al área superficial. Dichas ecuaciones tienen constantes de diseño típicos que, debido a su naturaleza, no proporcionan diseños adecuados ya que las condiciones bajo las cuales estas se formularon varían de acuerdo a las condiciones locales de cada estudio. Esto, finalmente se traduce en sobredimensionamientos e incrementos en costos de construcción y mantenimiento. A este reto se le suman las diversas consideraciones que se deben tomar en cuenta para diseñar en función a distintos indicadores de calidad de agua. Frente a esta complejidad, el aplicativo en mención toma los cuatro modelos para diseño de humedales más empleados en la literatura y se permite integrar los siguientes contaminantes: DBO<sub>5</sub>, SST, NT, NH<sub>4</sub>, PT y NO<sub>3</sub> para un diseño eficiente.

El aplicativo permite estudiar las variables involucradas en los típicos modelos de diseño para humedales artificiales a fin de comparar y optar por un diseño optimizado (menor área superficial). Se incluyen una fase de seguimiento (en caso el usuario cuente con datos) con herramientas de análisis estocástico para modificar los parámetros seleccionados y optimizar las constantes de diseño de un humedal de flujo superficial. Asimismo, el usuario puede gestionar la data recogida y evaluar indicadores estadísticos como varianza, media y eficiencia a fin de comprender el comportamiento del humedal construido. Asimismo, el aplicativo permite generar un reporte del diseño del humedal (formato estándar) en PDF a fin de permitir la cooperación entre usuarios y técnicos para que en futuro sea sencillo compartir la data generada y las consideraciones de humedales construidos en la región. De igual forma, se brinda el código del aplicativo para que eventualmente la herramienta trabajada aquí sirva como base para futuros proyectos en ingeniería relacionados a humedales artificiales.

Finalmente, para corroborar las exigencias en campo e incorporar las funcionalidades pertinentes dentro del aplicativo, se implementó en el distrito de Chincheros, provincia de Urubamba, región del Cusco, un humedal artificial de flujo superficial de 15.0 m<sup>2</sup>. El proyecto se diseñó en función a la remoción de DBO<sub>5</sub> y SST. Se encontró que las constantes de diseño sugeridas por el autor R. Reed en cuanto a remoción de DBO<sub>5</sub> son buenas aproximaciones, obteniendo un valor de  $p = 0.329$ , indicando que no hay prueba suficiente para afirmar que lo que predice el modelo y las mediciones de contaminante en campo son muy diferentes; es decir, el modelo y las constantes empleadas son predictivos. Por otro lado, el modelo empleado para SST y las mediciones en campo si fueron dispares empleando una constante de  $K_{20}=1000.0$  m/año en el diseño según el modelo del autor R. Kadlec. De acuerdo al análisis estocástico realizado con **HumePUCP** este debería de ser aproximadamente 150.0 m/año.

Palabras clave: #humedales #wetlands #artificiales #MATLAB #appdesigner #tesispuccp

## ABSTRACT

In the present work, an application was developed with the help of MATLAB software to accompany the design and maintenance phases of the implementation of surface flow constructed wetland projects. This application is freely available under the name HumePUCP for download at the following link: <https://bit.ly/3k2hOs7>.

The thesis work proposes a first approach for an optimized design of constructed wetlands based on the existing literature. On the one hand, there are various authors who propose different design equations based on surface area. These equations have typical design constants which, due to their nature, do not provide adequate designs since the conditions under which they were formulated vary according to the various local conditions. This ultimately translates into oversizing and increases in construction and maintenance costs. To this challenge are added the various considerations that must be taken into account to design based on different water quality indicators. Faced with this complexity, the built application takes the four most used models for wetland design in the literature and allows the integration of the following pollutants (BOD5, SST, NT, NH4, PT and NO3).

The application allows to study the variables involved in the typical design models for constructed wetlands in order to compare and choose an optimized design (lower surface area). A follow-up phase is included (if the user has data) with stochastic analysis tools to modify the selected parameters and optimize the design constants of a surface flow wetland. Likewise, the user can manage the collected data and evaluate statistical indicators such as variance, mean and efficiency in order to understand the behavior of the constructed wetland. Likewise, the application allows the generation of a report of the wetland design (standard format) in PDF in order to allow cooperation between users and technicians so that in the future it is easy to share the data generated and the considerations of wetlands built in the region. In the same way, the application code is provided so that the tool worked here may eventually serve as a basis for future engineering projects related to artificial wetlands.

Finally, to corroborate the requirements in the field and incorporate the pertinent functionalities within the application, a 15.0 m<sup>2</sup> surface flow artificial wetland was implemented in the Chincheros district, Urubamba province, Cusco region. The project was designed based on the removal of BOD5 and TSS. It was found that the design constants suggested by the author R. Reed regarding BOD5 removal are good approximations, obtaining a value of  $p = 0.329$ , indicating that there is not enough evidence to affirm that what the model predicts and the measurements of pollutant in the field are very different; that is, the model and the constants used are predictive. On the other hand, the model used for SST and field measurements were uneven using a constant of  $K_{20} = 1000.0$  m / year in the design according to the R. Kadlec model. According to the stochastic analysis carried out with HumePUCP this should be approximately 150.0 m / year.

Keywords: #humedales #wetlands #artificiales #MATLAB #appdesigner #tesispuccp

## DEDICATORIA



*Por todo su apoyo  
con cariño para mis padres,  
Raúl y Olga*

## AGRADECIMIENTOS

A mi asesor **Alexis Dueñas** por ser una infinita fuente de ideas y continuo apoyo, cuyos comentarios y discusión aportaron sustancialmente al desarrollo de este trabajo.

Al señor **Don Antonio Puma E. y familia** por brindar su tiempo y espacio donde se llevó a cabo la implementación de este proyecto tesis.

A mi tía **Ofelia Acuña R.**, por su retroalimentación constante y apoyo en la recolección de muestras y envío de las mismas.

A mi hermana **Ana Gabriela Acuña L.**, por su cariño, comprensión y apoyo todo el tiempo.

A mi hermana **Kathleen Acuña L.**, por su ejemplo de resiliencia y muestra de energía proactiva para ejecutar las cosas.

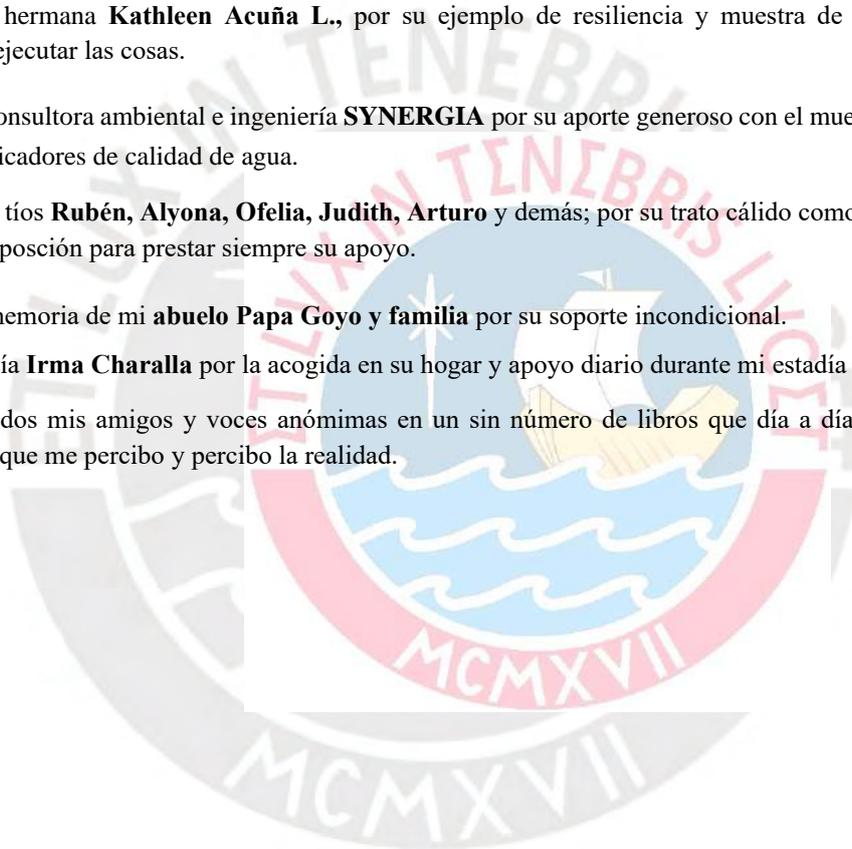
A la consultora ambiental e ingeniería **SYNERGIA** por su aporte generoso con el muestreo y medición de indicadores de calidad de agua.

A mis tíos **Rubén, Alyona, Ofelia, Judith, Arturo** y demás; por su trato cálido como personas y predisposición para prestar siempre su apoyo.

A la memoria de mi **abuelo Papa Goyo y familia** por su soporte incondicional.

A mi tía **Irma Charalla** por la acogida en su hogar y apoyo diario durante mi estadía en Lima.

Y a todos mis amigos y voces anónimas en un sin número de libros que día a día construyeron la forma que me percibo y percibo la realidad.



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Humedales construidos: clasificación</i> (R. Kadlec & Wallace, 2008, p. 5).....	15
Figura 2. <i>Corte transversal del detalle de un humedal de flujo superficial (como se cita en (Reed et al., 2006, p. 280))</i> .....	15
Figura 3. <i>Sección transversal de humedales de flujo subsuperficial. Nótese la interacción del afluente y medio poroso</i> (R. Kadlec & Wallace, 2008, p. 6).....	16
Figura 4. <i>Área superficial mínima requerida por contaminante según la Tabla 2.</i> .....	18
Figura 5. <i>Proceso de remoción de TSS en un humedal de flujo superficial. Fuente:(R. Kadlec &amp; Wallace, 2008)</i> .....	21
Figura 6. <i>Simulación de velocidades de flujo para distintas configuraciones de L:W</i> (Sabokrouhiyeh et al., 2016) .....	21
Figura 7. <i>Eficiencia volumétrica en humedales artificiales de flujo superficial (como se cita en(Sabokrouhiyeh et al., 2016)).</i> .....	22
Figura 8. <i>Comportamiento real de remoción de Fósforo (PT) en un humedal artificial en Orlando, Florida, Easterly Wetland ((R. Kadlec &amp; Wallace, 2008)).</i> .....	24
Figura 9. <i>Diagrama de equilibrio de masas</i> (Masters, G. 2008).....	25
Figura 10. <i>Tasa de descomposición para contaminantes de 1er orden</i> (Masters & Ela, 2008).....	25
Figura 11. <i>Comparativa de un modelo determinístico y estocástico para la detección de remoción de DBO</i> (R. H. Kadlec, 1997).....	28
Figura 12. <i>Resultados de remoción de DBO<sub>5</sub>. Nótese la correlación de incremento de la eficiencia con los meses donde se muestra mayor temperatura</i> (Fuente: (Maldonado, 2005)).....	30
Figura 13. <i>Crecimiento de Scirpus Totora</i> (Maldonado, 2005) .....	34
Figura 14. <i>Esquema de Vertedero Triangular</i> (Roca, 2016).....	34
Figura 15. <i>Detalles técnicos (bermas)</i> (R. Kadlec & Wallace, 2008) .....	35
Figura 16. <i>Eficiencia de la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) durante el periodo de estudio (Diciembre 2003-Octubre 2004)</i> (Maldonado 2005) .....	36
Figura 17. <i>Tecnologías de tratamiento de aguas residuales en Perú</i> (Arce, 2013 como se cita en PERUSAN, 2008).....	37
Figura 18. <i>Interfaz del aplicativo: La captura de pantalla muestra la parte de diseño que compone al aplicativo.</i> .....	41
Figura 19. <i>Shortcuts para acceso al documento sobre estándares de calidad de agua</i> .....	42
Figura 20. <i>Resumen de áreas superficiales necesarias según la metodología de Reed 2006.</i> ..	42
Figura 21. <i>Resumen de las constantes sugeridas por autor.</i> .....	43
Figura 22. <i>Resumen de ecuaciones empleadas por metodología o autor.</i> .....	44
Figura 23. <i>Modelo en SIMULINK para el enfoque volumétrico de KADLEC &amp; KNIGHT</i> .....	45
Figura 24. <i>Modelo de la ecuación citada como una subventana del modelo de la Figura 23</i> ..	46
Figura 25. <i>Recopilación de distintas metodologías empleadas en SIMULINK llamadas desde la interfaz principal de “Diseño” del aplicativo.</i> .....	47
Figura 26. <i>Gráfica que resulta del modelo evaluado en SIMULINK para la obtención del área superficial</i> (Fuente: propia).....	47
Figura 27. <i>Callbacks para ejecución en tiempo real del movimiento del slider.</i> .....	48

Figura 28. <i>Función assignin y simout para la asignación de variables al workspace o base en SIMULINK y simout como función de llamada para la ejecución de la simulación.</i>	48
Figura 29. <i>Almacenamiento de variables en MATLAB</i>	49
Figura 30. <i>Resumen de metodologías por contaminante (muestra de área superficial)</i>	50
Figura 31. <i>Calibración del Modelo en HumePUCP</i>	50
Figura 32. <i>Hoja en Excel pre-cargada para recolección de datos</i>	51
Figura 33. <i>Resumen de Resultados junto a indicadores estadísticos</i>	52
Figura 34. <i>Resultados de la prueba de hipótesis ejecutada sobre los datos medidos</i>	53
Figura 35. <i>Simulación estocástica a través del método de Montecarlo</i>	59
Figura 36. <i>Resultado de la modelación de la temperatura en HumePUCP (MaxValue=1)</i>	60
Figura 37. <i>Simulación estocástica con condiciones de entrada sintéticas para el análisis del sistema</i>	61
Figura 38. <i>Cosecha de Agua aledaña al terreno – coordenadas 13°25'25.47"S; 72°03'29.20"O (escala indicada en el inferior)</i>	62
Figura 39. <i>Situación actual de cosecha de agua en Chincheros, Cusco</i>	62
Figura 40. <i>Resultados de Laboratorio de la Cosecha de Agua al 06 de Octubre del 2018</i>	63
Figura 41. <i>Pronóstico de la temperatura y lluvia en aproximadamente 10 años en la provincia de Urubamba, Dpto. Cusco (Fuente: (WorldWeatherOnline, n.d.))</i>	64
Figura 42. <i>Presupuesto humedal artificial HumePUCP</i>	65
Figura 43. <i>Dispositivo para la medición de caudal – válvula</i>	66
Figura 44. <i>Implementación de dispositivo para la medición de caudal</i>	66
Figura 45. <i>Diagrama de Flujo para el diseño de un humedal artificial en HumePUCP</i>	68
Figura 46. <i>Diseño Eficiente de un humedal artificial empleando HumePUCP</i>	69
Figura 47. <i>Resultados de área superficial mínima para la remoción de SST</i>	70
Figura 48. <i>Empleo del aplicativo para el diseño del humedal Chincheros – Cusco. Metodología de Reed</i>	70
Figura 49. <i>Resultados del diseño – Metodologías Reed y Kadlec para DBO<sub>5</sub> y SST</i>	71
Figura 50. <i>Ficha técnica generada por HumePUCP con los detalles de diseño del humedal en Cusco</i>	72
Figura 51. <i>Gráfica de Barras, medición de caudal de ingreso y salida – Humedal Chincheros, Cusco</i>	74
Figura 52. <i>Análisis de muestras – Humedal Artificial – Junio 13 del 2019</i>	74
Figura 53. <i>Gráfico de barras humedal artificial – Demanda de Oxígeno (%) – Resultado de Muestras – Junio / Setiembre 2019</i>	75
Figura 54. <i>Histograma de Datos de OD – Humedal artificial – Chincheros, Cusco 2019</i>	76
Figura 55. <i>Gráfico de barras del humedal artificial – SST (ppm)</i>	76
Figura 56. <i>Histograma en intervalos discreteados para muestras – Resultados SST (ppm)</i>	77
Figura 57. <i>Gráfico de barras para las muestras – Resultados de pH y Salinidad</i>	77
Figura 58. <i>Demanda bioquímica de oxígeno en el tiempo (Masters &amp; Ela, 2008, p. 215)</i>	78
Figura 59. <i>Demanda bioquímica de oxígeno carbonaceo para las muestras del humedal Chincheros, Cusco</i>	79
Figura 60. <i>Fotografía cosecha de agua en el mes de marzo 2019</i>	80
Figura 61. <i>Cosecha de agua con aguas mínimas durante los meses de agosto - setiembre</i>	80
Figura 62. <i>Condiciones iniciales ingresadas</i>	81

Figura 63. <i>Resultados del seguimiento y modelamiento con metodología Kadlec y Knight</i> ....	81	<b>vii</b>
Figura 64. <i>Resultados – Diseño para SST</i> .....	81	
Figura 65. <i>Resultados – Diseño para DBOC</i> .....	82	
Figura 66. <i>Resultados del seguimiento y modelamiento con metodología REED para el DBO82</i>		
Figura 67. <i>Resultados del seguimiento al humedal artificial – Prueba de Hipótesis</i> .....	84	
Figura 68. <i>Modelación de Temperatura – Urubamba, Chincheros, Cusco.</i> .....	85	
Figura 69. <i>Simulación estocástica con HumePUCP</i> .....	85	
Figura 70. <i>Simulación Para <math>K_{20}= 500</math> m/d:</i> .....	86	
Figura 71. <i>Simulación Para <math>K_{20}= 200</math> m/d:</i> .....	86	
Figura 72. <i>Simulación Para <math>K_{20}= 100</math> m/d:</i> .....	86	
Figura 73. <i>Simulación Para <math>K_{20}= 150</math> m/d:</i> .....	87	
Figura 74. <i>Simulación estocástica final con HumePUCP</i> .....	87	



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Eficiencia de remoción de contaminantes en un humedal de flujo superficial (FSW) (Fuente: Como se cita en (Reed et al., 2006)),</i> .....	17
Tabla 2. <i>Área Superficial necesaria para distintas concentraciones de contaminante. Adaptación de (Rabat &amp; Trapote, 2016).</i> .....	17
Tabla 3. <i>Ventajas y desventajas del diseño de Área Superficial: Enfoque Volumétrico y Carga Superficial (Reed et al, 2006, p. 374).</i> .....	26
Tabla 4. <i>Valores de theta (<math>\Theta</math>) para remoción de DBO en diferentes tecnologías naturales de remoción (FWS: Flow Water Surface Wetland y SSF: Subsurface flow Wetland) (Fuente: R. H. Kadlec, 1997).</i> .....	31
Tabla 5. <i>Diversidad de valores de K20 (ver ecuación 3) propuesto dos distintos autores (Fuente: (Rousseau et al., 2003) )</i> .....	32
Tabla 6. <i>Nomenclatura de especies comunes para el uso en humedales artificiales (Maldonado, 2005)</i> .....	33
Tabla 7. <i>Límites para la concentración de contaminantes en aguas para diversos usos (Como se cita en (Maldonado, 2005, pg. 5).</i> .....	37
Tabla 8. <i>Principales reglamentos para la fiscalización ambiental en aguas residuales (Fuente propia)</i> .....	38
Tabla 9. <i>Límites máximos permisibles. Fuente: (MINAM, 2010).</i> .....	38
Tabla 10. <i>Valores de K20, <math>\theta</math>, C* para los distintos contaminantes para humedales de flujo superficial (como se cita en (Rabat &amp; Trapote, 2016, p. 71).</i> .....	40
Tabla 11. <i>La figura anterior son los resultados correspondientes a un análisis estadístico de la calidad de agua para el rio Strymon River en Grecia ((Antonopoulos et al., 2001) .....</i>	55
Tabla 12. <i>Resumen de las metodologías existentes por autor y por contaminante.</i> .....	57
Tabla 13. <i>Resumen de ecuaciones empleadas por metodología.</i> .....	57
Tabla 14. <i>Resumen de calidad del agua encontrada – Distrito Chincheros</i> .....	68
Tabla 15. <i>Constantes de diseño para el humedal artificial en Chincheros, Cusco.</i> .....	69
Tabla 16. <i>Recolección de tirantes y medición de caudal – humedal Chinchero</i> .....	73
Tabla 17. <i>Muestras de 1 – 4. Humedal Artificial Chincheros. Resultados entregados por SYNERGIA Ingeniería.</i> .....	75
Tabla 18. <i>Indicadores de calidad de agua (DBO y OD)</i> .....	78

## LISTA DE SÍMBOLOS

ix

[ ]: Concentración de un contaminante

As: Área superficial de diseño

C\*: Concentración de contaminante circundante (en el aplicativo como Cp)

Ce: Concentración de salida (*exit*)

CH: Carga hidráulica (Método Kadlec)

Co: Concentración inicial (subcero)

E<sub>factor</sub>: Factor de eficiencia

k: Tasa de descomposición genérica

k<sub>20</sub>: Ajuste para descomposición de contaminante en Reed et al, 2006

Kt: Tasa de descomposición asociada a la temperatura

n: Factor de porosidad del medio o Manning

Q: Caudal de diseño

Q<sub>in</sub>: Caudal de ingreso

THR: Tiempo de Retención Hidráulico

Tr: Tiempo de retención hidráulica

Tw: Temperatura del agua (*Temperature water*)

y: Profundidad del humedal

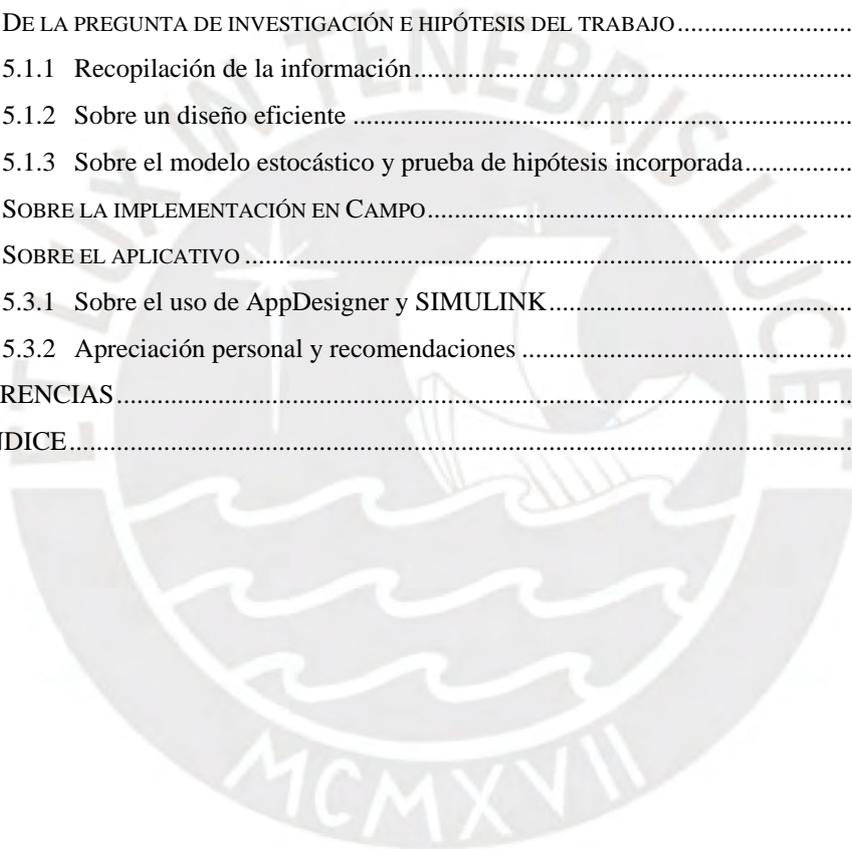
η: Eficiencia de remoción

Θ: Coeficiente de temperatura

## TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	11
1.1	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN .....	11
1.2	HIPÓTESIS .....	12
1.3	OBJETIVOS.....	12
2	MARCO TEÓRICO .....	13
2.1	HUMEDALES ARTIFICIALES: DEFINICIÓN Y ANTECEDENTES .....	13
2.2	SDGs – METAS DE DESARROLLO SOSTENIBLE ( <i>SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS</i> ) .....	14
2.3	CLASIFICACIÓN DE HUMEDALES.....	15
2.3.1	Humedales de Flujo Superficial ( <i>FWS: Free Water Surface Constructed Wetland</i> ).....	15
2.3.2	Humedales de Flujo Subsuperficial ( <i>SSF: Subsurface Flow Constructed Wetland</i> ).....	16
2.4	CARACTERIZACIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN HUMEDALES ARTIFICIALES .....	16
2.4.1	Remoción de contaminantes.....	18
2.4.2	Distribución de Flujo y Proporción L:W ( <i>Length:Width</i> ) .....	21
2.5	INVESTIGACIÓN EN TORNO AL MODELAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES .....	22
2.5.1	Principales modelos determinísticos ( <i>Input/Output</i> ):.....	25
2.5.2	Análisis Estocástico.....	28
2.5.3	Flora Empleada .....	33
2.5.4	Consideraciones Técnicas .....	34
2.6	SITUACIÓN ACTUAL DE HUMEDALES EN EL PERÚ.....	35
2.6.1	Implementaciones resaltantes.....	35
2.6.2	Aspecto Legislativo Nacional.....	37
3	METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	39
3.1	DEL DISEÑO TEÓRICO: .....	40
3.1.1	Análisis de Sensibilidad Paramétrico .....	40
3.1.2	Implementación en App Designer .....	40
3.1.3	Implementación SIMULINK.....	45
3.1.4	Resultados de Diseño .....	49
3.2	MANTENIMIENTO Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA:.....	50
3.2.1	Apartado A: Datos de Entrada y Análisis Estadístico .....	51
3.2.2	Apartado B: Gráficas.....	56
3.2.3	Apartado C: Modelación Estocástica .....	58
3.3	IMPLEMENTACIÓN EN CAMPO.....	61
3.3.1	Descripción del Caso.....	61
3.3.2	Diseño del Proyecto.....	64
3.3.3	Regulación y medición del Caudal.....	66
4	RESULTADOS .....	67
4.1	CON EL APLICATIVO: DISEÑO ÓPTIMO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL CON HUMEPUCP ....	68

4.2 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN EN CAMPO – CHINCHEROS, CUSCO .....	72	<b>xi</b>
4.2.1 Medición del caudal .....	72	
4.2.2 Seguimiento a la implementación en campo – Humedal Artificial Chincheros - Cusco 74		
4.2.3 Discusión de resultados .....	79	
4.3 SEGUIMIENTO AL HUMEDAL ARTIFICIAL CON HUMEPUCP - OBTENCIÓN DE CONSTANTES DE DISEÑO (CASO DEL APLICATIVO) .....	80	
4.3.1 Solidos Suspendidos Totales .....	80	
4.3.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	81	
4.3.3 Discusión de Resultados.....	82	
4.3.4 Análisis con el método de Montecarlo .....	85	
4.3.5 Discusión de Resultados – Implementación Montecarlo.....	88	
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	90	
5.1 DE LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN E HIPÓTESIS DEL TRABAJO .....	90	
5.1.1 Recopilación de la información.....	90	
5.1.2 Sobre un diseño eficiente .....	91	
5.1.3 Sobre el modelo estocástico y prueba de hipótesis incorporada.....	91	
5.2 SOBRE LA IMPLEMENTACIÓN EN CAMPO.....	93	
5.3 SOBRE EL APLICATIVO .....	94	
5.3.1 Sobre el uso de AppDesigner y SIMULINK.....	95	
5.3.2 Apreciación personal y recomendaciones .....	96	
REFERENCIAS .....	96	
APÉNDICE.....	100	



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Preguntas de Investigación

De acuerdo a los resultados de proyectos sobre humedales artificiales implementados en distintas partes del mundo, se ha demostrado una gran eficiencia de remoción de contaminantes para las aguas servidas (Carvalho P., et al 2017). No solo su eficiencia es un buen indicador para su implementación, sino también su facilidad de construcción y costos reducidos de mantenimiento. Por ello, los proyectos sobre humedales van dirigidos a aquellas zonas con escasos recursos y con una básica gestión de recursos del agua como son las zonas urbanas más alejadas de la ciudad.

Por otro lado, actualmente se cuentan con diversas tecnologías y herramientas que permiten análisis mucho más rápidos y eficientes en cuanto a la construcción y simulación en ingeniería. Sin embargo, el mayor problema en cuanto a estas implementaciones respecta es la variabilidad existente entre los resultados teóricos y prácticos de los datos medidos. Por ello, no resulta extraño buscar reducir dicha incertidumbre y realizar proyectos en ingeniería cada vez más asertivos y con mayor exactitud. El paquete de software **MATLAB** ofrece una gran diversidad de herramientas como el desarrollo de aplicativos que responden a esta demanda en torno a la optimización de sistemas.

En este sentido, desarrollado un modelo de optimizado de humedal artificial a través del software en mención, se construyó en el distrito de Chincheros, provincia de Urubamba - Cusco a fin de contrastar el modelamiento hecho en gabinete y eventualmente calibrar el diseño teórico. Eventualmente, este paso permitirá implementaciones de humedales artificiales más directas y de forma más sencilla, con la seguridad y rigurosidad ingenieril que lo amerita.

*A priori*, resulta intuitivo que de aplicarse un modelamiento a través de un software resultará en un sistema con un diseño eficiente, así el trabajo académico en esta tesis propone la siguiente pregunta de investigación: **¿Cuánta eficiencia y facilidad de diseño adquiere el modelamiento de un humedal artificial de flujo superficial en el software MATLAB?**

## 1.2 Hipótesis

El diseño asistido por computadora, a través de un estudio de sensibilidad paramétrica en el software MATLAB, resulta en implementaciones de humedales artificiales *más* eficientes en cuanto a la remoción de contaminantes de aguas servidas se trata. Siguiendo las líneas del método científico a través del cual se construye este trabajo; se plantea la siguiente hipótesis: De generarse valor agregado, tanto en eficiencia, seguimiento, costos y mantenimiento de un sistema como lo son los humedales artificiales se indaga realmente sobre esta efectividad computacional adquirida; verificando con una experiencia de implementación de un humedal artificial en el distrito de Chincheros, Cusco.

## 1.3 Objetivos

### 1.1.1. Objetivo general

Optimizar el diseño de humedales artificiales de flujo superficial a través de la implementación de un aplicativo con el software MATLAB.

### 1.1.2. Objetivos específicos

Desarrollar un aplicativo que permita, entre otras funciones:

1. Desarrollar un aplicativo que permita diseñar eficientemente un humedal artificial a través de análisis de sensibilidad paramétrico.
2. Permitir, dentro del aplicativo, el seguimiento al proyecto construido a través de la generación de gráficos e indicadores estadísticos y modelos estocásticos a fin de mejorar los parámetros de diseño iniciales.
3. Validar el modelo generado con la implementación y seguimiento en campo de un humedal artificial superficial en el distrito de Chincheros, provincia de Urubamba, Cusco.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Humedales artificiales: Definición y antecedentes

En el marco del cambio climático y estrés hídrico, son cada vez más las personas que se ven afectadas por la falta de gestión de recursos del agua. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) son aproximadamente siete litros de agua que se requieren una mujer lactante que tiene actividad física por encima de temperaturas promedio para satisfacer sus necesidades básicas, número por el cual el promedio de las personas también deberían satisfacer sus necesidades (Howard & Bartram, 2003). En el Perú se registran hasta 15.2 litros de consumo por día en distritos como Lurigancho-Chosica de la ciudad de Lima mientras en distritos como San Isidro se incurren hasta en 447.5 litros (Pimentel & Palacios, 2017). En respuesta al constante crecimiento de la demanda de recursos y escasez de los mismos se vienen desarrollando distintos trabajos como implementaciones de tecnología, a fin de optimizar y mejorar la calidad de vida de las personas en relación a sus necesidades básicas. En este contexto, nacen proyectos en torno al estudio de humedales naturales y artificiales con enfoques sociales y medioambientales.

Los humedales naturales son áreas donde el agua cubre el suelo, o está presente en la superficie del suelo o cerca de él todo el año o durante períodos de tiempo variables durante el año (US EPA, s/f-b). Más aún, dentro de la literatura se hace referencia a los humedales como los riñones de la naturaleza (Gonzales, 2017). Debido a la presencia prolongada del agua se crean condiciones que favorecen el crecimiento de plantas especialmente adaptadas (hidrófitas) que promueve el desarrollo de suelos característicos (hídricos) de los humedales (US EPA, s/f-b). Estos sistemas eventualmente permiten tratar el agua para su reutilización. Así también, poseen la función dentro de la cadena alimenticia, de producir grandes cantidades de alimentos trayendo así varias especies del entorno (US EPA, s/f-a). En los últimos años, los humedales naturales cobran mayor relevancia por la creación de instituciones internacionales que velan por el mantenimiento de estos. En particular, la Convención de Humedales (*Ramsar Convention on Wetlands of International Importance Especially as Waterfowl Habitat*) se crea en 1971 como una convención de un humedales naturales, y como sus siglas indican, se dedican a la preservación de estos ecosistemas (Ramsar Convention, 2016). En este sentido, se ha ideado reproducir dichos espacios artificialmente lo que posteriormente se denominarán como humedales artificiales o humedales construidos (o *Wetlands* en inglés).

Los humedales artificiales han sido un gran tema de estudio debido a la significativa eficiencia que han demostrado para el tratamiento de aguas residuales, subterráneas, de origen pluvial,

entre otros. A esto, se le agrega la facilidad de implementación y bajo costo de mantenimiento. Previamente, en los años 1950, la Dra. Kathe Seidel del Instituto Max Planck, en Alemania, hace las primeras investigaciones respecto al comportamiento de los humedales naturales. En sus informes plantea que tras el uso del junco común (*Schoenoplectus lacustris*) es posible la remoción de sustancias orgánicas e inorgánicas, así como la desaparición de bacterias dañinas como coliformes, salmonella y enterococos, propios de las aguas residuales (Verhoeven 2006, p. 70). Principalmente, esto se da gracias al transporte de oxígeno que recogen las hojas al estar expuestas principalmente al medio ambiente y transportar dicho oxígeno hasta la raíz a través del tallo. Dichas investigaciones sientan las bases para las futuras implementaciones de humedales artificiales en Europa. A la par, a fines de 1970 se funda en Estados Unidos la Agencia de Protección Medioambiental (EPA) cuyos objetivos son el consolidar investigaciones, monitoreo, estandarizado de prácticas y refuerzo de actividades para asegurar la protección del medio ambiente. Particularmente, el EPA es líder en producción de investigaciones y a la fecha ha sido capaz de brindar numerosos manuales en lo que respecta al diseño e implementación de humedales artificiales. Su más reciente producción titula “Un Manual de Humedales Construidos” en el año 2008. En él se brinda información detallada respecto a la planificación, construcción, monitoreo y mantenimiento de humedales artificiales. Asimismo, autores como Sherwood C. Reed presentan recopilaciones más teóricas respecto a la descripción y tipos de humedales artificiales en su más reciente producción titulada *Natural Wastewater Treatment Systems* (2006).

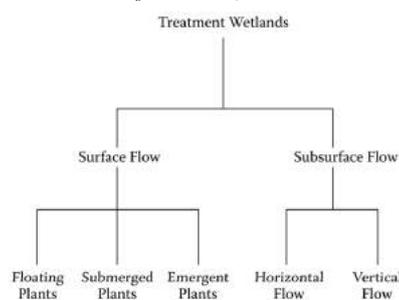
### **2.1.1 SDGs – Metas de desarrollo sostenible (*Sustainable Development Goals*)**

La Organización Mundial De Las Naciones Unidas (ONU) en el año 2015 implementó una colección de metas para un futuro sostenible en el marco del cambio climático (ONU, 2017). Para alcanzar dicha agenda se requiere el uso sostenible del agua mundial y los recursos de la tierra para asegurar seguridad para el acceso a la comida y al agua, biodiversidad y resiliencia al cambio climático. Por ello, los humedales tienen mayor relevancia debido a sus funciones para regular el ciclo global del agua, alta productividad y biodiversidad (Janse et al., 2019). Cabe resaltar que los humedales suministran tres cuartos del agua dulce para la naturaleza y consumo humano (FAO, 2016). Asimismo, los humedales generalmente aumentan la resiliencia al cambio climático mediante un amortiguamiento frente a las sequías e inundaciones, almacenamiento de carbono y de preservar los sistemas, aumenta el enfriamiento del clima en el largo plazo (como se cita en Janse et al., 2019). A continuación, se explorará diversos modelos, se implementará uno propio y se discutirán los alcances y limitaciones en cada caso.

## 2.2 Clasificación de Humedales

A continuación, se hace una pequeña revisión bibliográfica resaltando los puntos más importantes dentro de las dos principales categorías de humedales construidos. Los humedales construidos/artificiales se pueden caracterizar como:

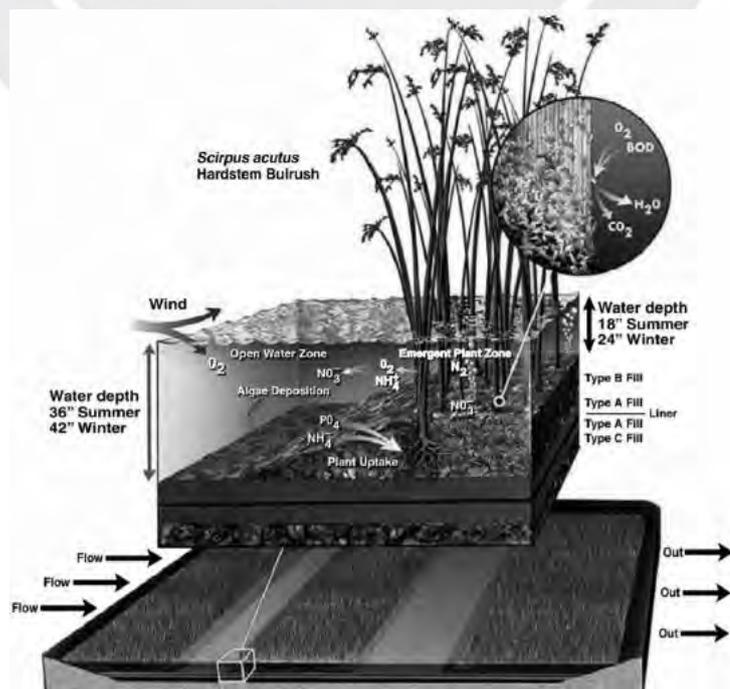
**Figura 1.**  
*Humedales construidos: clasificación (R. Kadlec & Wallace, 2008, p. 5)*



### 2.2.1 Humedales de Flujo Superficial (FWS: Free Water Surface Constructed Wetland)

Los humedales de este tipo se caracterizan por tener el agua al aire libre mientras que las plantas se encuentran por debajo del nivel del agua, como se detalla en la Figura 2. Una de las ventajas de este tipo de humedales es la facilidad de construcción y manejo, así como un bajo costo de construcción y mantenimiento. Sin embargo, por poseer el agua al aire libre, este da paso a la formación de larva y mosquitos. Generalmente, también se le añade una capa de impermeabilización en la base de la raíz de las plantas a fin de evitar la filtración del agua.

**Figura 2.**  
*Corte transversal del detalle de un humedal de flujo superficial (como se cita en (Reed et al., 2006, p. 280))*

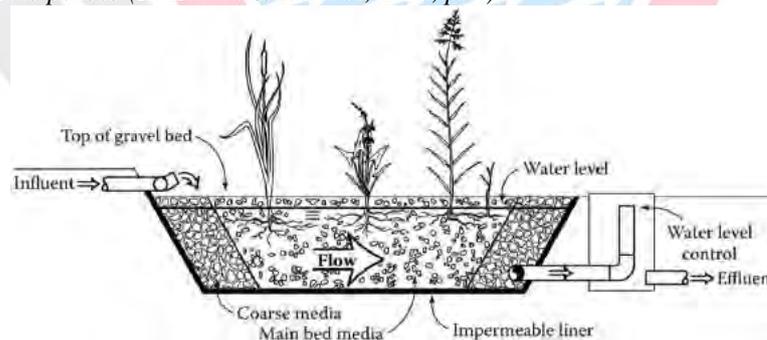


### 2.2.2 Humedales de Flujo Subsuperficial (SSF: Subsurface Flow Constructed Wetland)

Este tipo de humedales son un híbrido entre suelo y agua. Generalmente para el diseño de este tipo de humedales se considera la Ley de Darcy como aceptable para la descripción del medio poroso (Reed et al., 2006, p. 335). Una de sus ventajas es su funcionamiento con bajas temperaturas. También, otra ventaja frente al humedal de flujo superficial (FWS) los costos de construcción, operación y mantenimiento son mayores. Principalmente debido a que los de flujo superficial dan paso al afloramiento sobre la superficie (Maldonado, 2005, p. 19). Sin embargo, los humedales de flujo superficial perciben cambios ecológicos en menor grado manteniendo su capacidad de remoción por un significativo periodo de tiempo (R. Kadlec & Wallace, 2008, p. 5). Usualmente, los humedales de flujo superficial requieren mantenimiento periódico en la parte de la base (*bed*) por lo que el costo de este último suele ser mayor. Esto debido a que evidentemente el flujo se recoge a partir de las conexiones embebidas en el medio poroso. Asimismo, una ventaja de los humedales de flujo subsuperficial es la poca atracción para mosquitos y patógenos ya que no se muestran como hábitat favorables (R. Kadlec & Wallace, 2008, p. 5). Finalmente, se sabe *a priori* que por lo general los humedales de flujo subsuperficial requiere menor área para un determinado flujo en comparación a los humedales de flujo superficial (Reed et al., 2006, p. 16). A continuación, en la Figura 3 se muestra un esquema de los humedales de flujo subsuperficial:

**Figura 3.**

*Sección transversal de humedales de flujo subsuperficial. Nótese la interacción del afluente y medio poroso (R. Kadlec & Wallace, 2008, p. 6)*



## 2.3 Caracterización del tratamiento de Aguas Residuales en Humedales Artificiales

En la literatura se hace referencia a un amplio número de contaminantes los cuales pueden ser tratados a través de este tipo de sistemas. A continuación, se ha adaptado la Tabla 1 a fin de observar el potencial y diversidad que cuentan los humedales de flujo superficial para remover contaminantes.

**Tabla 1.**

*Eficiencia de remoción de contaminantes en un humedal de flujo superficial (FSW) (Fuente: Como se cita en (Reed et al., 2006, p. 294)).*

Contaminante	Afluyente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Remoción (%)
<i>Sólido Suspendidos Totales (SST)</i>	1008	30	97%
<i>Sólidos Disueltos Totales (SDT)</i>	1078	396	63%
<i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	456	45	90%
<i>Carbono Orgánico Total (COT)</i>	129	17	87%
<i>Cobre</i>	0.05	0.024	52%
<i>Plomo</i>	0.078	0.004	94%
<i>Mercurio</i>	0.0019	0.0019	0%
<i>Nickel</i>	0.082	0.01	88%
<i>Zinc</i>	0.08	0.03	62%

Sin embargo, como es de esperarse no todos los contaminantes son tratados de la misma forma, por ello son varias las ecuaciones y constantes para cada tipo de contaminante para el cual diseñar. No solo eso, si se deseará modelar estadísticamente, asunciones como comportamiento normal para todos los contaminantes serían errores fundamentales. Se han demostrado distintos comportamientos estadísticos para cada contaminante, incluyendo la temperatura (Antonopoulos et al., 2001). Esto, sin duda alguna, otorga una amplia gama de constantes de diseño y resultados, así como incertidumbre de su funcionamiento lo cual más tarde se traduce como sobredimensionamiento de dichos sistemas y por ende elevados costos de construcción.

Por si no fuera poco, no solo son múltiples los contaminantes para los cuales se tienen que tener consideraciones al momento de diseñar (si es que se desea tener una buena aproximación al final del diseño en cuanto a resultados se trata), también existen varios enfoques propuestos por diversos autores e instituciones. Más adelante en el acápite 2.4.1 *Principales Modelos Determinísticos* se detalla estos enfoques ya que será pertinente comprenderlos para incorporarlos en el aplicativo. Para ejemplificar la divergencia de los resultados se muestra la siguiente tabla resumen a continuación:

**Tabla 2.**

*Área Superficial necesaria para distintas concentraciones de contaminante. Adaptación de (Rabat & Trapote, 2016).*

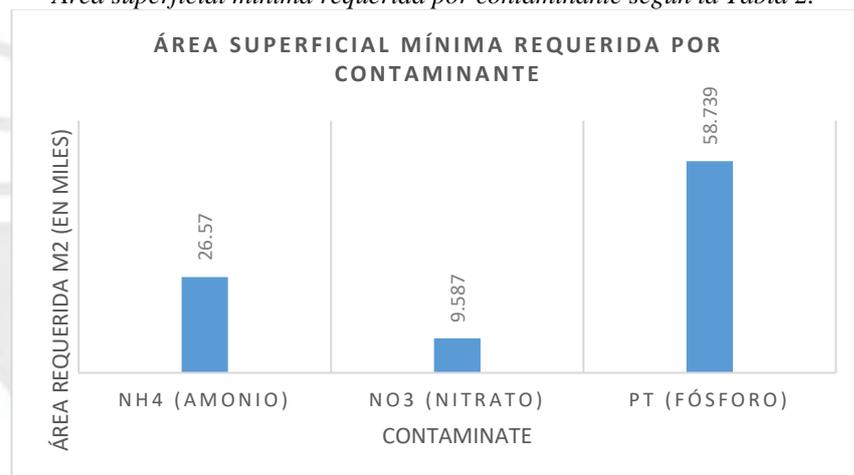
Contaminante	Concentración Afluyente (mg/l)	Concentración Efluente (mg/l)	<u>Área min</u> <u>Superficial</u> (ha)
DBO	120.0	20.0	16,180
SST	120.0	25.0	-

NT	25.0	10.0	-
NH4 (Amonio)	10.0	5.0	26,570
NO3 (Nitrato)	10.0	5.0	0,9587
PT (Fósforo)	10.0	2.0	58,739

Se observa así que para la etapa de diseño de humedales artificiales los resultados en cuanto al área superficial necesaria difieren en gran medida. Por ejemplo, nótese el área necesaria para la remoción de fósforo. Según los cálculos son aproximadamente 6 hectáreas (6 ha) de terreno de humedal para la remoción de este contaminante. Esto equivale aproximadamente a una superficie que consta de once canchas de fútbol. Evidentemente, en la práctica esto no se llegaría a consolidar. Obviando así la remoción de este contaminante en particular, o en su defecto incorporando un tratamiento posterior de acuerdo a los estándares de calidad de agua que se desean llegar. La Figura 4 muestra en perspectiva dichos valores (histograma).

**Figura 4.**

Área superficial mínima requerida por contaminante según la Tabla 2.



Por último, cabe resaltar la sensibilidad que acompaña a las constantes empleadas de diseño son grandes también. Esto nuevamente se traduce en sobredimensionamiento de los humedales y mayores costos de construcción, motivo por el cual urge la aplicación de un análisis de sensibilidad paramétrico a fin de reducir la incertidumbre que acompaña a estas constantes.

### 2.3.1 Remoción de contaminantes

Como se observa son diversos los contaminantes que se pueden encontrar en las aguas a tratar. Sin embargo, no es principal objetivo del presente trabajo hacer un análisis exhaustivo de todos los posibles contaminantes y su eliminación. Por lo tanto, el desarrollo del aplicativo e implementación en campo se limitará a evaluar principalmente contaminantes: DBO<sub>5</sub>, Nitrógeno, Fósforo y SST (Sólidos Suspendedos Totales).

### 2.3.1.1 *Remoción de DBO<sub>5</sub>*

El DBO<sub>5</sub> (Demanda Biológica de Oxígeno) es un indicador para caracterizar la calidad de agua. La relación química es la siguiente:



Mientras mayor cantidad de materia orgánica exista en el agua, mayor será la demanda biológica (o bioquímica) de oxígeno de los microorganismos presentes para remover dicha materia. Típicos valores de DBO<sub>5</sub> para sistemas contaminados van desde los 100 mg/l hasta los 200 mg/l. Asimismo, las fuentes naturales de oxígeno en las aguas son sus superficies por lo que en un sistema como lo son los humedales artificiales demanda una mayor área superficial. También, las raíces de las plantas funcionan como agentes integradores de oxígeno. Las plantas típicas en los humedales tienen la capacidad única de tomar el oxígeno presente en el medio y transportarla hasta sus raíces para que microorganismos adheridos en la raíz se alimenten y continúen el proceso de remoción de materia orgánica (Reed et al., 2006, p. 280).

Asimismo, es importante recalcar que la formación de algas en la superficie puede llegar a niveles inaceptables. De formarse en la superficie se impide la llegada de los rayos solares hacia la raíz. Esto limita procesos como la fotosíntesis y consecuentemente impide el proceso natural de disminución de DBO<sub>5</sub>. En este sentido, en (Reed et al., 2006, p. 281) plantea optar por sistemas mecánicos de aireación. En un humedal de flujo superficial este puede ser, por ejemplo, la caída del afluente por encima del sistema.

### 2.3.1.2 *Remoción de Nitrógeno*

El nitrógeno viene a ser otro elemento químico el cual es componente de la materia orgánica y a su vez es empleado también como fertilizante en la agricultura. Asimismo, el nitrógeno es uno de los mayores componentes en la industria farmacéutica (antibióticos), por lo que es fácil de encontrarlo en residuos humanos. La remoción de nitrógeno en los humedales se lleva a cabo por procesos como nitrificación y desnitrificación, solo el 10% de este son absorbidos por las plantas (Reed et al., 2006, p. 269). Los procesos mencionados son llevados a cargo principalmente por los microorganismos presentes en la raíz de las plantas. La presencia de nitrógeno es esencial ya que es el mayor constituyente de la clorofila, componente que las plantas usan a través de la luz solar y generan azúcares (carbohidratos) a través del agua y dióxido de carbono (The Mosaic Company, s/f).

### 2.3.1.3 *Remoción de Fósforo*

El fósforo es un elemento químico presente en todos lados tanto en nuestros alimentos, así como en aguas subterráneas debido principalmente al uso de fertilizantes en el campo. El fósforo es un nutriente esencial en el crecimiento de cultivos por lo cual su demanda a nivel mundial dobla en número al de la población mundial (Philpott, s/f). Sin embargo, no todos los cultivos tienen la facultad de absorber este elemento por lo cual el remanente se filtra hacia las aguas subterráneas desembocando en lagunas y humedales. Esto, en el largo plazo, produce la formación de algas que el oxígeno presente y crean zonas “muertas” (Philpott, s/f). También el fósforo proviene de los desechos de los animales domésticos en el campo, así como de la orina del ser humano. Una práctica habitual en zonas rurales es usar este material para fortalecer las bondades del suelo, pero el desproporcionado uso de este material colapsa los sistemas formando igualmente residuos de fósforo. Finalmente, el fósforo es un elemento finito en la tierra, el cual a la fecha no se tiene control sobre su uso desmedido.

Estas últimas afirmaciones reafirman el uso de humedales artificiales. Ahora bien, el mecanismo de remoción de fósforo en humedales de flujo superficial proviene de la adsorción, precipitación química (creación de sólidos en una solución) y captación de las plantas. Sin embargo, las plantas biológicamente llegan a un punto en el que mueren por lo que, en el tiempo, la remoción de fósforo disminuye (Reed et al., 2006, p. 272). Finalmente, remoción de fósforo depende de la interacción con el medio (suelo) ya que este se retiene y a su vez dependerá del tiempo de retención en cada humedal (Reed et al., 2006, p. 273).

### 2.3.1.4 *Remoción de Sólidos Suspendedos Totales (SST)*

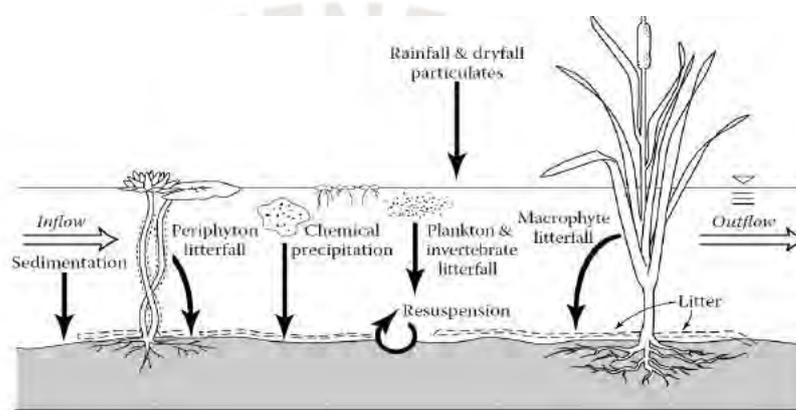
Otro de las mayores características de los humedales es su capacidad de remoción de sedimentos suspendidos en el agua. Este, al igual que el resto de contaminantes, es el producto de una relación compleja dentro de estos ecosistemas donde se llega incluso a producir *biota transportadora de SST* en la raíz (R. Kadlec & Wallace, 2008, p. 203).

En especial en humedales de flujo subsuperficial el mecanismo es meramente físico, donde estos contaminantes se retienen con el medio. Sin embargo, la materia se acumula en un largo plazo influyendo negativamente en la conductividad hidráulica del sistema (R. Kadlec & Wallace, 2008, p. 204). Es importante resaltar que los sólidos suspendidos tienen consecuencias negativas en ecosistemas acuáticos, donde estos no son removidos completamente. Por un lado, las aguas vertidas con significativa carga de este contaminante cubren a organismos plásticos que bloquea la absorción de oxígeno de estos, resultado en su muerte. Matthias Rillig, un ecologista de plantas en la Universidad Libre de Berlín en sus

primeras investigaciones encontró que suelos cargados de microfibras de poliéster retenía más humedad y pareciera afectar la actividad de los microorganismos cruciales para el ciclo de nutrientes del suelo (Browne, et al., 2008) levantando la preocupación en agricultores alrededor del mundo. Finalmente, las aguas turbias son causadas principalmente por materia suspendida, aunque componentes solubles orgánicos pueden contribuir (R. Kadlec & Wallace, 2008, p. 203) por lo cual caracterización de las aguas turbias en base a su color suele servir como referente de medición de TSS. Se presente un esquema sobre el proceso en general sobre el proceso de remoción de TSS en humedales de flujo superficial.

**Figura 5.**

*Proceso de remoción de TSS en un humedal de flujo superficial. Fuente: (R. Kadlec & Wallace, 2008, p. 207)*

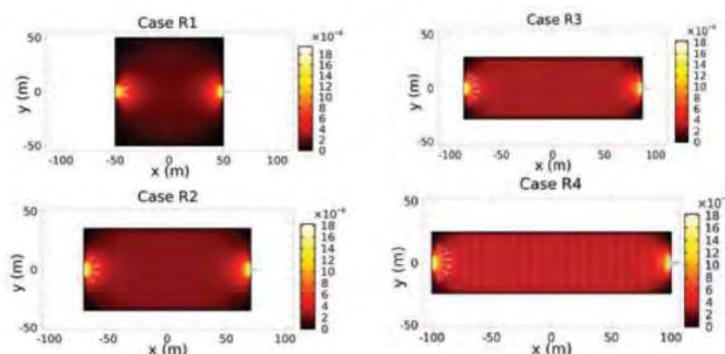


### 2.3.2 Distribución de Flujo y Proporción L:W (Length:Width)

Dentro de la caracterización del funcionamiento de humedales artificiales resalta también la distribución del flujo y la relación de ancho y largo (L:W). Diversos autores han llevado a cabo simulaciones a fin de comprender la eficiencia proveniente de estas variables. Por ejemplo, (Sabokrouhiyeh et al., 2016) simuló la velocidad del flujo a través de diferentes configuraciones L:W en humedales de flujo superficial.

**Figura 6.**

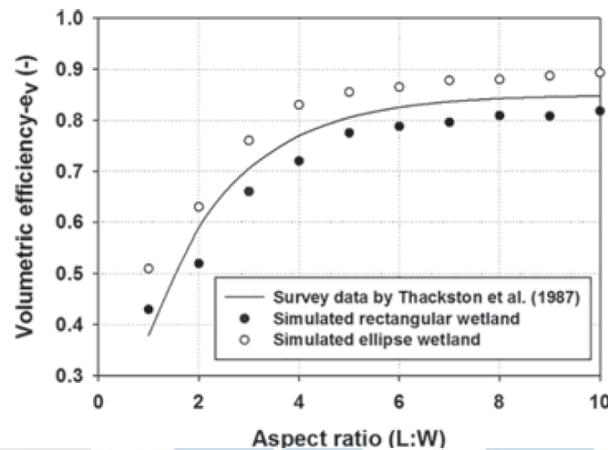
*Simulación de velocidades de flujo para distintas configuraciones de L:W (Sabokrouhiyeh et al., 2016)*



Se observa zonas muertas (las zonas de color más oscuro) con menores velocidades de flujo, por donde se infiere que a mayor proporción L:W mejor será la irrigación de a través del humedal. Así, nuevamente gracias a las investigaciones de (Sabokrouhiyeh et al., 2016) se han recogido datos de diferentes configuraciones de humedales y tras un ajuste exponencial se verifican los resultados:

$$\text{Eficiencia } e_v = 0.85(1 - e^{-0.59 \frac{L}{W}}) \quad (2)$$

**Figura 7.**  
Eficiencia volumétrica en humedales artificiales de flujo superficial (como se cita en (Sabokrouhiyeh et al., 2016)).



Como se observa, hasta cierto punto de relación L:W tiene una tendencia a mejorar su eficiencia. Sin embargo pasada una relación aproximada de 6 la eficiencia otorgada por una mayor relación L:W no es tan significativa. Estos datos serán relevantes finalmente para diseñar el humedal artificial más adelante.

#### 2.4 Investigación en torno al modelamiento y optimización de humedales artificiales

Dentro de la revisión bibliográfica sobre el diseño de humedales artificiales, se pueden caracterizar a estos en *dos* tipos de enfoques principalmente: las de tipo entrada/salida (*input/output models*) también conocidos como modelos determinísticos que en su mayoría emplean ecuaciones cinéticas de descomposición de primer orden como los PFR (*Plug Flow Reactor*); y el enfoque probabilístico. Este último es de particular interés ya que el modelamiento se hace tratando de reducir la incertidumbre que hay entorno al modelamiento de este tipo de sistemas tan complejos.

El primer tipo de modelamiento es el enfoque que ampliamente se ha estudiado debido a la simplificación y facilidad final con la que se logran diseñar humedales. Sin embargo, estos

modelamientos de “caja negra” o *black box models* pasan por alto las reacciones complejas que se llevan a cabo en los humedales liderando a veces una sobre simplificación (Rousseau et al., 2003). Por ejemplo, se deja de lado factores importantes como el clima y sus estaciones, diseño del material base (altura, ancho, largo) (Rousseau et al., 2003) así como la capacidad de tratamiento de las plantas en el tiempo y la acumulación de sedimentos.

Dentro de este enfoque existen modelos mucho más complejos que se han desarrollado a fin de optimizar íntimamente estos diseños. Por ejemplo, el modelo presentado por Wynn y Liehr precisamente trata de englobar la mayoría de procesos. Así su modelo comprende seis submodelos interconectados que representan los ciclos de carbono y nitrógeno, balances entre agua/oxígeno, así como el crecimiento, deterioración y metabolismo de bacterias heterotróficas y autotróficas. Así el modelamiento de 15 variables se lleva a cabo mediante 15 ecuaciones diferenciales y hasta 42 parámetros que consideran los procesos biológicos, físicos y microbiológicos (Rousseau et al., 2003). Evidentemente este tipo de enfoques escapa algunas limitaciones en el campo de la ingeniería como suelen ser el tiempo y costo, de llevarse al campo estos proyectos. Sin embargo, no pueden desestimarse dichos esfuerzos ya que en la academia estos representan mayor entendimiento de los procesos que se llevan a cabo dentro de un humedal.

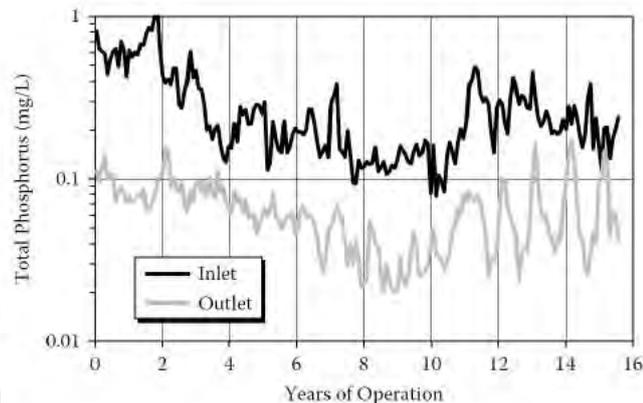
En este sentido, cabe resaltar la importancia que otorga la investigación científica de (Rousseau et al., 2003) ya que finalmente se concluye que no necesariamente modelos más complejos representan un diseño óptimo, al menos lo suficiente como para descartar los modelos base o los de tipo *Input/Output*.

Por otro lado, los modelamientos también se pueden categorizar en paralelo a través de otro enfoque: el probabilístico u estocástico. En estadística, un enfoque determinístico es aquel sistema donde los resultados se pueden predecir o conocer con exactitud, mientras que un sistema estocástico se caracteriza por su naturaleza aleatoria. Evidentemente, para el modelo que se discute en esta tesis, los procesos que se llevan a cabo en un humedal artificial son de tipo estocástico. Grandes variaciones caracterizan estos procesos. El llamado a incorporar un análisis de este tipo nace desde hace mucho con diversos autores quienes han estudiado estos sistemas a detalle. Desde las investigaciones más rigurosas y minuciosas hasta grandes manuales comerciales para el diseño de humedales artificiales. Por ejemplo, Kadlec y Knight en su manual “*Treatment Wetlands*” en su segunda versión dedican varios sub acápites con este enfoque, sin embargo, no se hace referencia a un análisis mayor. Por ejemplo, respecto a la remoción de fósforo en el manual en mención, para modelar el desempeño de los humedales, en general, comprende un componente determinístico y un componente estocástico

caracterizados por ecuaciones apropiadas y una o más distribuciones probabilísticas (R. Kadlec & Wallace, 2008, p. 386). A continuación, se visualiza el comportamiento en mención en el siguiente gráfico:

**Figura 8.**

*Comportamiento real de remoción de Fósforo (PT) en un humedal artificial en Orlando, Florida, Easterly Wetland ((R. Kadlec & Wallace, 2008, p. 387)).*



La Figura 8 es una muestra clara de la naturaleza de estos sistemas. Por un lado, se observa un desfase casi constante en ambas curvas lo cual sugiere la remoción del contaminante es persistente. Asimismo, es clara la variabilidad del sistema ya que existe “ruido” en ambas curvas. Finalmente, claramente el autor señala que estos efectos, por definición, son aleatorios y no pueden predecirse basándose en el estado actual de la ciencia de los humedales (R. H. Kadlec, 1997). Sin embargo, las variaciones estocásticas muestran típicamente un rango limitado de variabilidad. Al combinar un gran número de observaciones en un sistema de humedales dado, se pueden usar estadísticas para cuantificar el rango de variabilidad dentro del sistema de humedales (R. H. Kadlec, 1997). Asimismo, el mismo autor en una investigación publicada en 1997 titulada **“Aspectos determinísticos y estocásticos en diseño y performance de humedales artificiales”** concluye sus investigaciones con la siguiente afirmación.

*Las ecuaciones de diseño actuales solo describen el componente determinista del comportamiento de los humedales y, por lo tanto, deben ir acompañadas de descripciones adecuadas del comportamiento estocástico. Se puede anticipar que más datos acompañados de un modelamiento de Montecarlo, mejorarán la tecnología en este sentido en el futuro. (R. H. Kadlec, 1997)*

Hasta este punto se han discutido dos enfoques de modelamiento de tratamiento de aguas residuales a través de los humedales artificiales. Por un lado, está claro que enfoques complejos no necesariamente representan los diseños más óptimos de trabajo. Asimismo, consideraciones sobre la naturaleza aleatoria del sistema son importantes. En este sentido, se

desarrollarán a continuación cuatro de los modelos más usados para el diseño de humedales artificiales de tipo *input/output*. Estos modelos también se escogieron para incorporar en el aplicativo para el análisis de sensibilidad respectivo y converger a una solución óptima. Finalmente, se desarrollará un modelamiento a través del método de Montecarlo que acompaña en la etapa de diseño dentro aplicativo.

#### 2.4.1 Principales modelos determinísticos (*Input/Output*):

Si bien los modelos descritos a continuación tienen distintos enfoques, la mayoría de ellos parte de un supuesto fundamental: *modelamiento en un reactor tipo pistón a través de ecuaciones cinéticas de descomposición de primer orden*. El modelamiento a través de un reactor permite obtener una buena aproximación respecto a las reacciones físico-químicas que se están llevando a cabo dentro de un humedal. Sin embargo, este enfoque no considera las reacciones complejas e interacciones reales que ocurren en los humedales a nivel biológico, solo se emplean constantes que se limitan a modelar la reacción entre la entrada y salida de masa del sistema. Este enfoque es el mejor que se puede emplear dada la información y comprensión de los procesos en humedales que se tiene actualmente (Reed et al., 2006, p. 326). En el marco del estudio de la termodinámica, el desarrollo de un modelo PFR (*Plug Flow Reactor*) nace desde la primera ley de la siguiente forma:

**Figura 9.**  
*Diagrama de equilibrio de masas (Masters, G. 2008)*

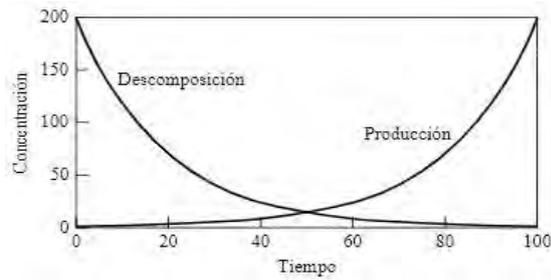


Se establece la ley de conservación de la energía, donde el flujo entrante es equivalente al flujo de salida. Esta relación se llevará a cabo a través de una descomposición del contaminante presente en el flujo entrante. De esta forma se obtienen la expresión:

$$V \frac{dc}{dt} = -Vkc \quad (1)$$

En este caso, como en el resto de la literatura, se asume que los contaminantes son de 1er orden (descomposición de forma exponencial), lo que justifica la existencia de la constante C en la ecuación 1.

**Figura 10.**  
*Tasa de descomposición para contaminantes de 1er orden (Masters & Ela, 2008)*



Luego integrando por partes se encuentra la ecuación fundamental que describe la descomposición exponencial de un contaminante en un reactor con flujos de entrada y salida.

$$C_{salida} = C_0 e^{-kt} \quad (2)$$

Asimismo, los modelamientos a continuación obtienen un área óptima asociado a una remoción específica de contaminante. Usualmente la cantidad de contaminante que se busca reducir está relacionado al tipo de uso que se pretende dar a las aguas tratadas. Con este fundamento teórico a continuación se describen los siguientes modelos:

#### 2.4.1.1 Modelo 1: Propuesta por Reed et al - 2006

Los modelos propuestos para humedales de tipo de flujo superficial en el manual “*Natural Wastewater Treatment Systems*” por Sherwood C. Reed et al se pueden categorizar en dos tipos: un enfoque volumétrico y un modelamiento de carga superficial. El modelamiento volumétrico responde estrictamente a uso de ecuaciones de continuidad en hidráulica con las ecuaciones de un *PFR* (*plug flow reactor*). Mientras que un enfoque de carga superficial considera concentraciones de contaminantes retenidas o que no reaccionaron (ver curva acumulación en la Figura 10). A continuación, se han adaptado las principales ventajas y desventajas entre ambos enfoques y en la sección metodología se desarrollará a detalle las ecuaciones involucradas para eventualmente su implementación en el software MATLAB:

**Tabla 3.**

*Ventajas y desventajas del diseño de Área Superficial: Enfoque Volumétrico y Carga Superficial (Reed et al, 2006, p. 374)*

Enfoque Volumétrico	Carga Superficial
<b>Ventajas</b>	
El diseño se basa en el flujo promedio a través del sistema. Esto permite compensar las pérdidas y ganancias de agua debidas a la precipitación y evapotranspiración.	Los modelos se basan en la carga de masa en la superficie del humedal; por lo tanto, la profundidad del agua, que puede ser difícil de determinar para sistemas grandes, no es un factor en los cálculos de diseño.
Los factores de seguridad y las concentraciones de fondo se tratan como condiciones de contorno externo y no tienen un impacto limitante en los resultados matemáticos de los modelos de diseño.	Estos modelos son más flexibles matemáticamente. Es posible producir un mejor ajuste de los datos existentes con este modelo de dos variables ( $K, C^*$ ) en comparación con los modelos volumétricos de una sola variable ( $K$ ).
<b>Desventajas</b>	

Los factores de seguridad y las concentraciones de fondo se tratan como condiciones de contorno externo y no tienen un impacto limitante en los resultados matemáticos de los modelos de diseño.	Los modelos solo tratan con el volumen de entrada de aguas residuales (Q). Esto no permite compensar las pérdidas y ganancias de agua en los cálculos de diseño.
La porosidad de la vegetación y la basura acumulada debe ser conocida. Los valores de diseño asumidos se basan en una base de datos limitada, y es probable que el valor cambie a largo plazo.	La base de datos de flujo superficial utilizada para el desarrollo de estos modelos incluye una gran cantidad de sistemas de humedales de con gran ajuste. El uso de estos datos puede producir constantes K de baja velocidad de remoción que a su vez podrían resultar en diseños de sistemas de humedales innecesariamente grandes.
Se asume que la eliminación de DBO depende de la temperatura según la experiencia con otros procesos de tratamiento de aguas residuales; sin embargo, los datos de muchos sistemas operativos de humedales no demuestran la dependencia de la temperatura.	La posición interna de los términos de concentración de fondo (o ya existentes) (C *) y factor de seguridad (z) en los modelos para determinar el área del humedal puede resultar en tamaños de humedal excesivos para lograr concentraciones bajas.

#### 2.4.1.2 *Modelo 2: Kadlec y Knight*

Este modelo ya ha sido anteriormente descrito en la sección 2.4.1.1 Modelo 1 como enfoque de área superficial (*Areal Based Process*). Sin embargo, en la literatura se hace referencia a este como el enfoque perteneciente a Kadlec y Knight, ya que en 1996 fueron pioneros con dichos trabajos. Asimismo, en la presente tesis se denominará a la metodología de carga superficial como la metodología “Kadlec”.

#### 2.4.1.3 *Modelo 3: Propuesta por el EPA 2000*

La Agencia para la Protección Medio Ambiental (*Environmental Protection Agency EPA*) brinda un enfoque distinto en cuanto al modelamiento para la remoción de contaminante en un humedal se trata. Contrario a la asunción de descomposición de los contaminantes de 1er orden (descomposición cinética), la función es de tipo función inversa. Se tiene así modelos para la remoción de dos contaminantes: DBO<sub>5</sub> y Coliformes Fecales. La diferencia reside solamente en la constante **K** empleada para ambos casos.

$$\frac{C_e}{C_o} = \frac{1}{(1 + t * K_B)^N} \quad (3)$$

Cabe resaltar que estos modelos permiten diseñar para humedales en serie, siendo N el número de humedales en serie.

#### 2.4.1.4 *Modelo 4: WEF MOP FD-16*

Las ecuaciones propuestas por el Water Pollution Control Federation en su manual práctico (FD-16) son solo aplicables a al diseño para la remoción de NT (nitrógenos totales) y NH<sub>4</sub> (amonio). La forma es como se detalla a continuación para NT y NH<sub>4</sub> respectivamente:

$$A_s = \frac{100Q}{[0.645C_e - 0.125C_o + 1.129]} \quad C_e = 0.193C_o + 1.55 \ln CH - 1.75$$

$$A_s = \frac{100Q}{e^{1.527 \ln C_e - 1.050 \ln C_o + 1.69}} \quad C_e = \frac{18.31C_o Q}{A_s} - 0.16063 \quad (4)$$

Como se observa, la aproximación es totalmente distinta a las metodologías anteriormente descritas. En particular, se observa el ajuste estadístico el cual corresponde a las constantes que ajustan a las ecuaciones. Asimismo, estas ecuaciones ya no dependen de una constante K de descomposición. Naturalmente estas siguen tendencias y regresiones estadísticas que mejor se aplicaron al estudio para aquellas condiciones en las cuales fueron estudiadas.

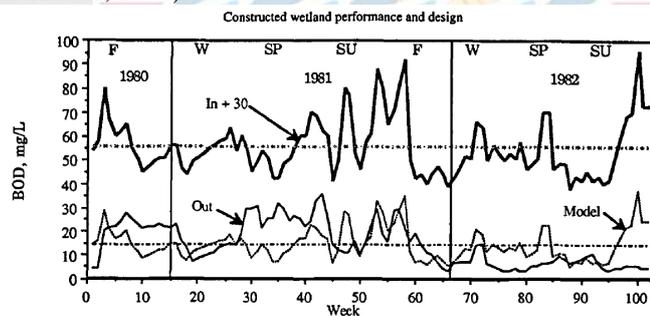
Como se encontrará más adelante, estas aproximaciones suelen estar sesgadas y no corresponden a predicciones reales o próximas, resaltando nuevamente la importancia del presente trabajo.

#### 2.4.2 Análisis Estocástico

En la Figura 11 se pueden observar **tres curvas** principalmente. En primer lugar, el gráfico representa las mediciones de DBO en el tiempo. Las curvas “*in+30*” y “*Model*” responden a un modelo de **tipo I/O** y el tercer resultado “*Out*” son las mediciones reales en la salida del sistema.

**Figura 11.**

*Comparativa de un modelo determinístico y estocástico para la detección de remoción de DBO (R. H. Kadlec, 1997)*



La figura plasma concretamente cómo son los procesos de forma estocástica y determinística. Por un lado, las mediciones de entrada y las predicciones de salida tienen un desfase de 30 mg/L que se aplicó para poder apreciar mejor el gráfico. Si se quita este desfase de 30 mg/L existe un desfase propio del sistema de 40 mg/l entre las curvas de DBO entrante y lo esperado o la curva *model*. Así se resalta principalmente que entre estas dos curvas son idénticas ya que se usó un modelo de tipo *input/output*. Sin embargo, la realidad es otra. A través de la curva “*out*” se aprecia que en realidad lo que se mide varía respecto a lo esperado si se compara con la curva del modelo. Esta es la naturaleza estocástica del sistema estudiado. Cabe resaltar que

las predicciones fueron consistentemente bajas para la primavera (*spring*) de 1981 (semanas 30-40) y consistentemente altas para el verano del 1982 (semanas 70-90) (R. H. Kadlec, 1997). Asimismo, la naturaleza aleatoria corresponde a que algunos procesos y algunas concentraciones que ingresan en el flujo varían de acuerdo a la estación del año (R. H. Kadlec, 1997) y esta variación puede confundirse con un parámetro importante de diseño como es la temperatura. Eventualmente, R. H. Kadlec concluye subrayando la importancia de incorporar enfoques estocásticos en el modelamiento.

#### 2.4.2.1 *Influencia por la variación de la concentración de entrada (Input Variation)*

En primer aspecto y más importante a tomar en cuenta es la característica que define el comportamiento del humedal: *las concentraciones de entrada*. Las variaciones estocásticas típicamente muestran una variabilidad limitada. Al combinar una larga cantidad de datos en un humedal en particular, se puede cuantificar esta variabilidad (R. Kadlec & Wallace, 2008, p. 163). Kadlec y Knight en la siguiente ecuación muestra una primera aproximación a este problema de la siguiente forma:

$$C_o = C_{avg} \left[ 1 + A \cdot \cos(\omega(t - t_{max})) \right] + E = C_{trend} + E \quad (5)$$

Se destaca la ecuación anterior ya que ciertos parámetros son de particular interés para el desarrollo de este acápite. Por un lado, debe notarse que la ecuación busca describir la concentración de **salida** del contaminante. También, tiene parámetros importantes como **A** el cual refiere a la amplitud de la variación en torno a una función sinusoidal como lo es el coseno. Luego, la ecuación es dependiente del tiempo (t) y se le agregar un componente aleatorio **E** al cual se entiende como “ruido”. Finalmente, esta aproximación define un punto de partida. Nótese  $C_{avg}$  es el punto de partida de donde el ruido se crea.

$$C_{avg} = \frac{C_{max} + C_{min}}{2} \quad (6)$$

Dado esta primera aproximación teórica se procede a detallar otras variables involucradas en el diseño. Su estudio y comprensión permitirán incorporar con la suerte de software disponible como MATLAB un modelo bastante aproximado o más realista. Más adelante, este pronóstico permitirá a los ingenieros encargados de diseño de humedales comprender bajo ciertos parámetros que gobiernan el medio, describir el comportamiento del humedal para una región en específico.

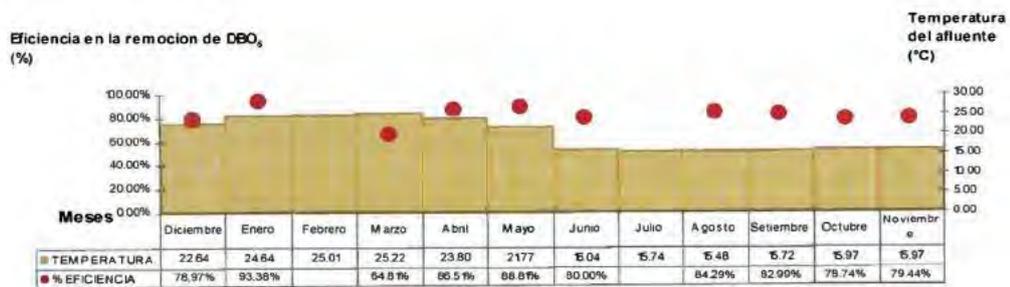
#### 2.4.2.2 *Influencia por Temperatura*

La temperatura ha sido una variable ampliamente discutida en la literatura. *A priori*, se consideraba que incrementos de temperatura facilitaban el proceso de remoción de contaminantes por parte de las plantas en el humedal. Muchos procesos biológicos

individuales tienen tasas sensibles a la temperatura y, por consiguiente, las constantes de velocidad de remoción que representan los procesos de tratamiento en humedales también pueden ser sensibles a la temperatura (R. H. Kadlec, 1997). Esta conclusión se hace a través de una correlación de resultados. Sin embargo, es importante recalcar que una correlación no siempre implica una consecuencia (*correlation does not imply causation*). Así en la tesis (Maldonado, 2005) distinguió valores ligeramente más elevados en la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno para los meses más cálidos afirmando que a mayores temperaturas, mejora la capacidad de remoción de humedales.

**Figura 12.**

*Resultados de remoción de DBO<sub>5</sub>. Nótese la correlación de incremento de la eficiencia con los meses donde se muestra mayor temperatura (Fuente: (Maldonado, 2005))*



Asimismo, las reacciones físico-químicas responsables en la remoción de DBO<sub>5</sub>, nitrificación y desnitrificación son conocidas por ser dependientes de la temperatura (como se cita en Reed et al, 2006 pg. 302). Sin embargo, como se detalló anteriormente, una directa relación entre remoción de DBO<sub>5</sub> y la temperatura no es causal. Pues se debe considerar que el tiempo de retención hidráulica suele ser extenso en las temporadas de invierno, y este suele compensar la falta de capacidad de remoción de las plantas (Reed et al, 2006.pg 302). También la remoción de DBO<sub>5</sub>, TSS (Sólidos Suspendidos Totales) y TP (Fósforo) generalmente suelen ser independientes de la temperatura.

En la Tabla 4 se muestra cómo se hace uso de índices como  $\Theta$  para establecer esta relación. Más adelante en la metodología esta correlación se hará más evidente. Pues bien, un valor de  $\Theta \approx 1$  indica que no existe efecto en la eficiencia de remoción de fósforo por efecto de la temperatura. Mientras que por otro lado la remoción de nitrógeno si se ve favorecida por mayores temperaturas ( $\Theta \approx 1.05$ ) (R. H. Kadlec, 1997).

Sin embargo, la reducción de un contaminante generalmente implica una intrincada red de transferencias y transformaciones que involucran procesos físicos tales como sedimentación y absorción, almacenamientos y conversiones mediados por microbios, captación y almacenamiento en biota de diversos tamaños e historias de vida y transferencias de otros

reactivos como el oxígeno y el dióxido de carbono. Algunos procesos, y algunos flujos y concentraciones entrantes, son variables según la estación, y esas influencias pueden confundirse con los efectos de la temperatura (R. H. Kadlec, 1997).

**Tabla 4.**

Valores de theta ( $\Theta$ ) para remoción de DBO en diferentes tecnologías naturales de remoción (FWS: Flow Water Surface Wetland y SSF: Subsurface flow Wetland) (Fuente: R. H. Kadlec, 1997)

FWS Wetlands		SSF Wetlands	
Listowel, ONT (5 wetlands)	0.930-1.011	Richmond, NSW (3 wetlands)	0.915-0.972
Arcata, CA (12 wetlands)	0.97-1.01	Snogerod, SWE	1.003
Orlando, FL	0.976	Mühlen, AUS	1.006
Columbia, MO	0.980	<b>Overland Flow</b>	
Wetwang, UK	0.973	Data from 3 studies	1.000-1.019
Richmond, NSW	0.913	<b>Facultative Lagoons</b>	
Brookhaven, NY	0.991	Data from several lagoons	0.962-1.015
Ouray, CO	1.019		

Se observa que la inclusión de un coeficiente de temperatura en el análisis de datos influye poco de la varianza en los datos. Por ejemplo, incluir un factor  $\Theta$  en los datos de FWS (Tabla 5) representa un porcentaje muy pequeño de varianza (R. H. Kadlec, 1997). Teniendo en cuenta la rigurosidad del diseño en cuanto a temperatura se refiere, se prosigue a detallar las consideraciones descritas por *Reed et al* que ayudarán más adelante al modelamiento respectivo.

#### **Efecto del clima y temperatura**

El Perú se caracteriza por ser un país ampliamente diverso. Varias regiones están sometidas a variaciones de temperatura constantemente y de forma significativa, llegando incluso a temporadas de congelamiento en la estación de invierno. En el marco de amplias variaciones de la temperatura, su influencia se puede modelar a través de la expresión:

$$k_t = k_{20} \Theta^{T_w - 20} \quad (3)$$

Particularmente, los humedales de tipo flujo superficial son más sensibles a los cambios de temperatura por precisamente tener el agua expuesta a la intemperie. Por ello, un congelamiento total del mismo resulta siendo el peor escenario exigiendo así consideraciones por temperatura. Ahora bien, se tiene que hacer una distinción precisa sobre qué valor de temperatura se discute, y en campo se va a medir. Por ello, lo ideal es hacer mediciones y seguimientos de la temperatura dentro del humedal. Debido a un gradiente de variación de este a lo largo del humedal (la temperatura en el fondo no será el mismo que en la superficie) y además ciclos de hielo y deshielo, es que (Reed et al., 2006, p. 302) propone diversas consideraciones. Estas consideraciones se discutirán ampliamente en la metodología de trabajo ya que serán material de discusión e implementación en el aplicativo. Asimismo, la formación de una capa de hielo puede actuar como una barrera térmica lo cual disminuye la velocidad de

congelamiento del agua en la base (Reed et al., 2006, p. 302). Finalmente, cabe resaltar que en casos extremos la formación de hielo en la superficie puede crear zonas muertas, evitando el flujo parcial o total del sistema. Por ello, en localidades con hasta  $<20^{\circ}\text{C}$  se propone el uso de humedales de forma estacionaria favorables (Reed et al., 2006, p. 303), es decir que su uso se limite a temporadas con condiciones. La Tabla 5 muestra una serie de valores de  $K_{20}$  que se emplean en la ecuación 3 a fin de diseñar humedales artificiales. Si bien se pueden tomar valores referenciales por autores con mayor credencial como lo es Reed et al, no hay certeza última sobre si este se aplica a las condiciones de un proyecto en particular.

**Tabla 5.**

*Diversidad de valores de  $K_{20}$  (ver ecuación 3) propuesto dos distintos autores (Fuente: (Rousseau et al., 2003) )*

Reference	No. of beds	$k_A$ (mday <sup>-1</sup> )	$k_v$ (day <sup>-1</sup> )	Remarks
<i>BOD</i>				
Crites [25]			0.8–1.1	0.8 = sand; 1.1 = gravel ( $T^{\circ}\text{C}$ )
Reed and Brown [21]			1.104	$K_{20}$ with $\theta = 1.06$
Tanner et al. [4]	8		0.17	$k_T$ —gravel beds
Tanner et al. [4]	8		0.22	$K_{20}$ with $\theta = 1.06$ —gravel beds
Wood [16]			1.84	$\epsilon = 0.42$ —medium sand ( $20^{\circ}\text{C}$ )
Wood [16]			1.35	$\epsilon = 0.39$ —course sand ( $20^{\circ}\text{C}$ )
Wood [16]			0.86	$\epsilon = 0.35$ —medium sand ( $20^{\circ}\text{C}$ )
Kadlec and Knight [13]		0.085–1	0.3–6.11	
Kadlec [15]		0.49		$C^* > 3 \text{ mg L}^{-1}$ and $\theta = 1.00$ ( $20^{\circ}\text{C}$ )
Vymazal et al. [26]		0.19		Proposed by Kickuth
Brix [27]		$0.118 \pm 0.022$		Mean $\pm$ 95% limits—depends on load
Schierup et al. [28]	49	0.083		Danish systems
Cooper [29]		0.067–0.1		UK systems
Brix [17]	70	0.16		$C^* = 3.0 \text{ mg L}^{-1}$ —soil based
Brix [17]	70	0.068		$C^* = 0 \text{ mg L}^{-1}$ —soil based
Kadlec et al. [1]		0.133		Czech republic wetlands
Kadlec et al. [1]	1	0.07–0.097–0.13–0.18–0.31–0.17		6 consecutive years, Czech republic wetland:
Cooper et al. [30]		0.06		$C^* = 0 \text{ mg L}^{-1}$ —secondary wetlands
Cooper et al. [30]		0.31		$C^* = 0 \text{ mg L}^{-1}$ —tertiary wetlands
Kadlec et al. [1]	14	0.17		$C^* = 0 \text{ mg L}^{-1}$ —tertiary wetlands USA
Liu et al. [31]			0.86	Gravel beds—soluble cBOD, $20^{\circ}\text{C}$

#### 2.4.2.3 Método de Montecarlo para el modelamiento de sistemas estocásticos

Se define al método de Montecarlo como una técnica de análisis numérico que emplea data aleatoria para simular fenómenos del mundo real (Asai & Wright, 2018). Se sabe que un sistema natural como un humedal (natural/artificial) es un sistema altamente aleatorio por lo ya mencionado anteriormente. Para el caso en particular resulta interesante generar valores aleatorios de acuerdo a condiciones iniciales y colocarlas dentro de las ecuaciones de diseño para evaluar dicha respuesta.

### **Generación de números aleatorios en MATLAB**

La ciencia en computación detrás de la generación de números aleatorios es basta, desde los algoritmos más complejos con soluciones elegantes para herramientas de uso cotidiano (*Mersenne Twister* para Microsoft Excel (Matsumoto & Nishimura, 1998) por ejemplo) hasta enfoques más radicales (reales) como obtención de números aleatorios a través de fenómenos físicos como ruido atmosférico generado a través de tormentas eléctricas (Mads Haahr, 2020). El presente trabajo se limita a incorporar las herramientas que ofrece MATLAB para la generación de números aleatorios (MathWorks, 2020). En particular MATLAB cuenta con dos alternativas para la generación de dichos números: la primera siguiendo una distribución normal y la segunda una distribución uniforme. Aunque, como se discutirá más adelante, los contaminantes no necesariamente siguen una distribución uniforme y/o normal, dichas consideraciones se tomarán en cuenta para realizar una buena aproximación en las simulaciones correspondientes. En este sentido, para generar una simulación aproximada en la Metodología de Trabajo se describe a detalle los componentes de la simulación estocástica.

### **2.4.3 Flora Empleada**

La planta de totora es de particular interés para la presente tesis ya que es la que más abunda en la zona de Chincheros, en especial en los humedales naturales colindantes. En quechua a la totora se le conoce como *Chhullu*. Al margen de sus bondades bioquímicas y su adherencia de microorganismos en la base para la remoción de contaminantes, la totora, así como el carrizo y el junco, extienden su uso hasta la artesanía, medicina e incluso como material de construcción. A continuación, se ha adaptado la Tabla 16 describiendo la diversidad de flora empleada en humedales.

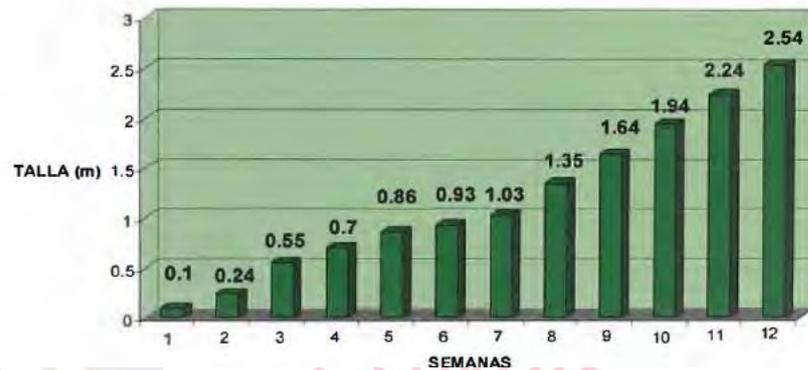
**Tabla 6.**  
*Nomenclatura de especies comunes para el uso en humedales artificiales (Maldonado, 2005)*

<b>Familia</b>	<b>Nombre Científico</b>	<b>Nombres Comunes</b>	<b>Temperatura Deseable °C</b>	<b>Rango de pH</b>
<b>Ciperáceas</b>	Carex sp.	No se registran	14-32	5-7.5
	Eleocharis sp.	No se registran		
	Scirpus lacustris I.	Juno de laguna		
	Scirpus Tatora	Tatora		
<b>Gramíneas</b>	Glyceria fluitans (L) R	Hierba del mana	12-23	2-8
	Phragmites australis (Cav) Trin. Ex. Steudel (*)	Carrizo		
<b>Juncáceas</b>	Juncus s.p.	Juncos	16-36	5-7.5
<b>Tifáceas</b>	Thypha sp (*)	Eneas, aneas, espadañas	10-30	4-10

### 2.4.3.1 Totora

En la región de Puno se emplean para la confección de artículos de vestir y decorativos, generando un impacto económico en la zona. Asimismo, en Lima-Perú, el ingeniero Victor Maldonado en su tesis: *Uso de Wetlands para el tratamiento y reuso de Aguas Residuales domésticas* registró los siguientes datos relevantes:

**Figura 13.**  
*Crecimiento de Scirpus Totora (Maldonado, 2005)*

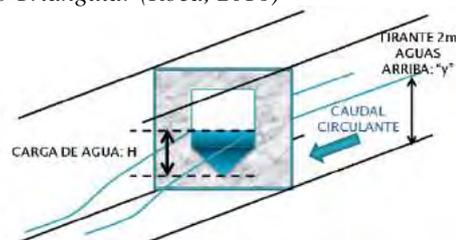


## 2.4.4 Consideraciones Técnicas

### 2.4.4.1 Captación del Afluente

Son varias las formas por las cuales las aguas a tratar pueden ser almacenadas y redistribuidas. Particularmente esta rama en la ingeniería pertenece a la Hidráulica (de canales). Por lo general la idea que prima para la obtención del afluente es la medición del caudal. Dentro de la amplia gama de metodologías aplicadas a la medición de caudales, en particular para la presente tesis será pertinente detallar el funcionamiento de los verteros, en particular los vertederos triangulares. De darse la situación el caudal en un canal abierto puede medirse con un vertedero. Ello consiste en la obstrucción en el cauce del canal que obliga al líquido a estancarse detrás y verter a través de la cresta (Roca, 2016).

**Figura 14.**  
*Esquema de Vertedero Triangular (Roca, 2016)*



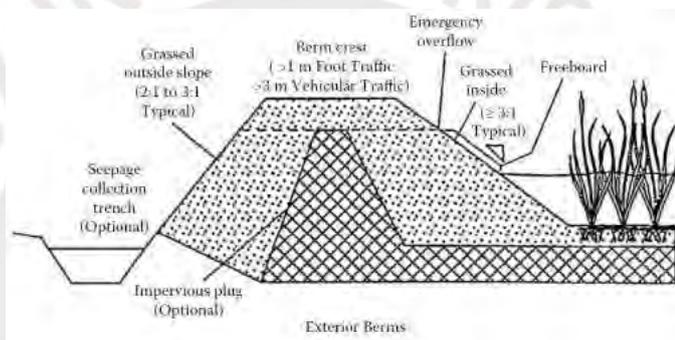
La fórmula de medición aplicada es la siguiente (Roca, 2016). Donde  $C_d$  es el coeficiente de ajuste para obtener el caudal real.

$$Q_{real} = Cd * \frac{8}{15} \sqrt{2 \cdot g \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \cdot H \cdot \frac{5}{2} \quad (7)$$

#### 2.4.4.2 Construcción de Bermas

Construcción de bermas en el contorno debe ser adecuado para evitar el desbordamiento de del agua en la venida de fuertes tormentas así como permitir el flujo controlado de escape en caso esto llegara a ocurrir (R. Kadlec & Wallace, 2008). Las bermas también tiene que considerar que la vegetación va a crecer gradualmente y con minerales y sedimentos orgánicos que incrementan la resistencia del flujo y reducen las bermas o *freeboards* en el tiempo (R. Kadlec & Wallace, 2008, p. 669).

**Figura 15.**  
Detalles técnicos (bermas) (R. Kadlec & Wallace, 2008, p. 669)



#### 2.4.4.3 Traslado y plantación de la Flora

La obtención de plantas se puede hacer bien mediante un traslado externo o mediante la plantación de semillas. Evidentemente, la segunda opción acarrea la espera de un tiempo prudente para empezar la remoción de contaminantes. Asimismo, en caso se desee hacer el traslado se debe también esperar un tiempo prudente para que las plantas puedan adaptarse. De ser zonas con riguroso control ambiental, se debe adquirir el permiso respectivo (Reed et al., 2006, p. 327).

## 2.5 Situación actual de humedales en el Perú

### 2.5.1 Implementaciones resaltantes

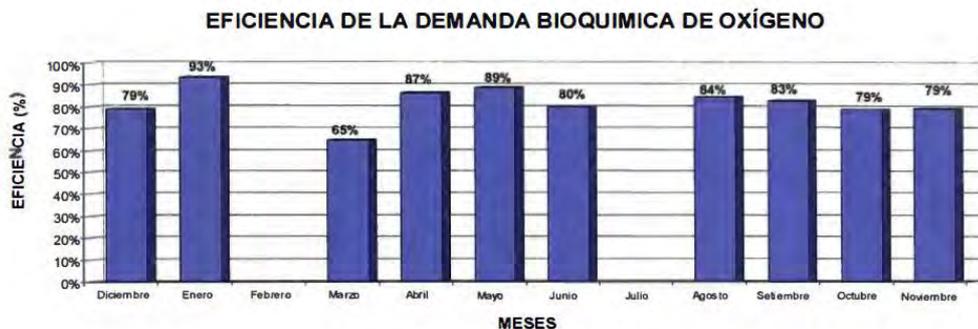
Por otro lado, al Perú le concierne el uso de humedales artificiales por muchos motivos. Entre ellos destaca el poco acceso al agua y pobres sistemas de saneamiento en zonas urbana. Asimismo, el Perú siempre se ha caracterizado por su amplia diversidad ecológica siendo un motivo más para el desarrollo e implementación masiva de estas tecnologías ecosostenibles. En este sentido, en la actualidad ya existen proyectos que se encuentran en funcionamiento. El proyecto más significativo es “Ejemplo para un saneamiento ecoeficiente con reuso total

de efluentes y biosólidos tratados, aplicado en el Colegio San Christoferus, Lima” por la Dra. Heike Hoffman. El Colegio San Christoferus tiene una población equivalente a 70 habitantes, dispone de un saneamiento integral de 100% de tratamiento y reuso de residuos líquidos y sólidos (Hoffmann, 2007). Hoy en día cuenta con tres humedales artificiales y recupera cada día aguas grises y negras tratadas para el riego de zonas verdes (Hoffmann, 2007). Más adelante los resultados son alentadores pues el principal objetivo de dicho proyecto se cumple al servir como ejemplo para futuras implementaciones de este tipo de tecnologías e involucrar activamente a la comunidad que se sirve de esta. Asimismo, sirve como referencia en cuanto a metodologías y principales retos que se afrontan al hacer este tipo de implementaciones.

Igualmente, son significativos los aportes que se han venido haciendo en la Universidad Nacional de Ingeniería. Se ha implementado humedales artificiales, específicamente en la planta de tratamiento de aguas denominada UNITRAR. Al inicio del proyecto se registraron de las aguas residuales cargas de DBO<sub>5</sub> y DQO de 250.00 mg/l y 500 mg/l respectivamente, a la cual se obtuvieron 93% de remoción para el DBO<sub>5</sub> y 97% para el DQO en promedio (Maldonado, 2005).

**Figura 16.**

*Eficiencia de la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) durante el periodo de estudio (Diciembre 2003-October 2004) (Maldonado 2005)*

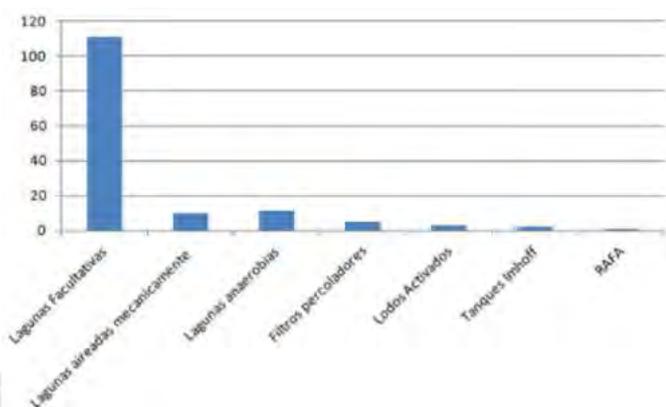


Asimismo, en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos también se realizaron estudios mediante el diseño de prototipos para una futura implementación de humedales artificiales en la misma ciudad universitaria. Sus principales aportes de investigación suponen el desarrollo teórico/matemático mediante un modelo de un reactor tipo pistón (Plug Flow Reactor) en humedales artificiales. Finalmente, en nuestra casa de estudios también se vienen realizando aportes respecto a humedales. En el año 2013 se propone el trabajo de tesis titulado “Urbanizaciones Sostenibles: Descentralización del tratamiento de aguas residuales residenciales” por Luis Francisco Arce Jáuregui. Esta tesis de carácter informativo reúne la situación actual de plantas de tratamiento y humedales en el Perú. El estudio realizado comprendió una recopilación en cuanto a las políticas existentes y diferentes proyectos que

hasta la fecha del estudio se habían estado llevando a cabo en nuestro país. Entre ellos, por ejemplo, son de interés particular la recopilación de información respecto al nivel de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales implementadas hasta la fecha en el Perú.

**Figura 17.**

*Tecnologías de tratamiento de aguas residuales en Perú (Arce, 2013 como se cita en PERUSAN, 2008).*



## 2.5.2 Aspecto Legislativo Nacional

En el Perú existen diversas entidades, sobre todo las gubernamentales, que tienen como fin regir las aguas tratadas para diversos usos. Estos comunicados se hacen generalmente a través de decretos emanados por el poder ejecutivo. Dentro de las autoridades quienes destacan su participación en este ámbito son: el ANA (Autoridad Nacional del Agua), el MINAM (Ministerio del Ambiente), Minagri (Ministerio de Agricultura y Riego), OEFA (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental), entre otros.

A continuación, se ha adaptado el siguiente cuadro informativo sobre los límites biológicos, químicos y contaminantes potenciales de la “Ley General de Aguas” propuesta en su primera edición en 1964.

**Tabla 7.**

*Límites para la concentración de contaminantes en aguas para diversos usos (Como se cita en (Maldonado, 2005, pg. 5)*

	CLASE I	CLASE II	CLASE III	CLASE IV	CLASE V	CLASE VI
<b>PARÁMETROS Y OTRAS NECESIDADES</b>	Fuentes de Abastecimiento sin Tratar	Fuentes de Abastecimiento Tratadas	Riego de Cultivos Alimenticios que se comen crudos	Agua para recreación de contacto directo	Maricultura	Recreación General y Protección Ambiental
<b>COLIFORMES TERMOTOLERANTES, NMP/100 ML (80% DE MUESTRAS MENSUALES)</b>	0	4000	1000	1000	200	4000

<b>COLIFORMES TOTALES, NMP/100 ML (80% DE MUESTRAS MENSUALES)</b>	8.8	20000	5000	5000	1000	20000
<b>OXÍGENO DISUELTO [MG/L]</b>	3	3	3	3	5	4
<b>DBO TOTAL [MG/L]</b>	5	2	15	10	10	10
<b>METALES [MG/L]</b>	0.05	0.05	1	n/a	0.05	0.05
<b>CROMO</b>	0.02	0.002	0.01	n/a	0.0001	0.0002
<b>MERCURIO</b>	1	1	0.5	n/a	0.01	96 h L C50 x 0.01
<b>COBRE</b>	0.05	0.05	0.1	n/a	0.01	0.03
<b>PLOMO</b>	0.01	0.01	0.05	n/a	0.00002	0.004
<b>CADMIO</b>	0.002	0.002			0.002	96 h LC50x0.02
<b>NIQUEL</b>	0.2	0.2			0.005	0.005
<b>FENOLES</b>	0.0005	0.001			0.001	0.1

**Tabla 8.**

*Principales reglamentos para la fiscalización ambiental en aguas residuales (Fuente propia)*

Ley N° 28611.- Ley General Del Ambiente	Texto único ordenado del reglamento de la ley general de servicios de saneamiento - ley n° 26338, aprobado por decreto supremo n° 023-2005-vivienda	Reglamento de protección ambiental para proyectos vinculados a las actividades de vivienda, urbanismo, construcción y saneamiento, aprobado por decreto supremo n° 015-2012-vivienda.
Ley N° 29338.- Ley De Recursos Hídricos	Ley N° 27972 - Ley Orgánica De Municipalidades	Reglamento de organización y funciones de la autoridad nacional del agua, aprobado por decreto supremo n° 006-2010-ag
Reglamento De La Ley N° 29338 - Ley De Recursos Hídricos, Aprobado Por Decreto Supremo N° 001-2010-Ag	Decreto supremo n° 003-2010-minam - decreto supremo que aprueba límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales	Resolución jefatural n° 274-2010-ana que dicta medidas para la implementación del programa de adecuación de vertimientos y reúso de agua residual - paver

Asimismo, se tiene el DECRETO SUPREMO N° 003-2010-MINAM que regula especialmente el vertedero de aguas tratadas a través de PTARs (Plantas de Tratamiento). Este artículo es de interés ya que es un referente empleado por laboratorios a nivel nacional y lo será de igual forma para la presente tesis.

**Tabla 9.**

*Límites máximos permisibles. Fuente: (MINAM, 2010)*

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS
<b>ACEITES Y GRASAS</b>	mg/L	20
<b>COLIFORMES TERMOTOLERANTES</b>	NMP/100 mL	10000
<b>DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO</b>	mg/L	100
<b>DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO</b>	mg/L	200
<b>PH</b>	unidad	6.5-8.5
<b>SÓLIDOS TOTALES EN SUSPENSIÓN</b>	mL/L	150
<b>TEMPERATURA</b>	°C	<35

### 3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

En todo proyecto en ingeniería se cuentan con dos etapas: el diseño (o trabajo en gabinete) seguido de la construcción del proyecto. El primero abarca todo lo respecto a la planificación; desde la consideración de ubicación, presupuesto, diseño, estudios complementarios, etc. En la segunda etapa netamente se pone en práctica las consideraciones técnicas que se hicieron en la etapa previa. Finalmente, se complementa esta segunda etapa con un mantenimiento o seguimiento del desenvolvimiento del proyecto. Esta última etapa es de vital importancia ya que un buen seguimiento a un sistema natural, como es un humedal artificial, asegura el trabajo eficiente de remoción de contaminantes a lo largo del tiempo.

En este sentido, el enfoque para el desarrollo del presente trabajo de tesis, el cual resulta en un aplicativo en MATLAB, son los dos mencionados anteriormente: *Diseño Teórico y Mantenimiento*.

**MATLAB** (*Matrix Laboratory*) es un aplicativo desarrollado por la compañía *Mathworks* con un lenguaje de programación propio, ampliamente empleado en el ámbito académico y científico. Por un lado, se cuenta con la potencialidad de sus funciones que se han ido mejorando en el tiempo en cuanto a cálculo matemático se refiere, y a su vez se cuenta con una serie de guías conocidas como *MATLAB Documentation* que han permitido a los usuarios aplicar dicho software. Como una suerte de *código abierto*, se invita a que posteriormente se repotencie el presente trabajo para futuros investigadores y que el aplicativo sea de mayor utilidad.

Se ha empleado también **MATLAB-APP DESIGNER** por tener una interfaz gráfica amigable y de fácil uso. Por un lado, se tienen las herramientas de medición como *sliders*, gráficos, botones, *gadges*, *switches*, etc que se pueden incorporar su funcionalidad rápidamente. Luego, la aplicación de estas proviene de una alternancia del almacenamiento de las variables denominado *workspace*. Este último espacio, denominado *workspace* permite la comunicación entre el AppDesigner y Simulink.

**SIMULINK**: Para simplificar aún más la implementación de modelos matemáticos se ha empleado este último. Esta herramienta permite simular sistemas de cualquier tipo, ya sean modelos químicos, sistemas mecánicos, procesamiento de redes de comunicación, sistemas eléctricos, etc. De esta forma, mediante la interacción de ambas herramientas de MATLAB (**App Designer y Simulink**) se puede construir el aplicativo ofreciendo una interfaz gráfica amigable y una simulación de sistemas eficiente y sencilla. A continuación, se detallará como

parte de este capítulo las consideraciones técnicas y criterios en cuanto a diseño de humedales artificiales se refiere, acompañado de los detalles técnicos más pertinentes usados para desarrollar el aplicativo.

### 3.1 Del Diseño Teórico:

#### 3.1.1 Análisis de Sensibilidad Paramétrico

En primer lugar, está claro que existen varios enfoques para el diseño de humedales (Reed et al, Kadlec y Knight, EPA 2000, Ecuaciones de Regresión, Rules of Thumb, etc). A su vez cada enfoque desarrolla una ecuación para un contaminante en particular (DBO<sub>5</sub>, Fósforo, NT, SST, etc). Luego, cada enfoque para cada contaminante lleva consigo constantes que se consideran, hasta ahora, fijas (parámetros como K(t), K<sub>p</sub>, K<sub>20</sub>,  $\theta$ , n, etc). Con fines prácticos, se podría visualizar estos tres componentes en una matriz de 3 dimensiones: metodologías vs contaminantes vs constantes. A continuación, se muestra la siguiente tabla con las constantes de diseño empleadas en el modelo de Kadlec y Knight:

**Tabla 10.**

*Valores de K<sub>20</sub>,  $\theta$ , C\* para los distintos contaminantes para humedales de flujo superficial (como se cita en (Rabat & Trapote, 2016, p. 71)*

	SS	DBO <sub>5</sub>	Norg	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	Nt	Pt
K <sub>20</sub> (m/año)	1000	34	17	18	35	22	12
$\theta$	1.065	1	1.05	1.04	1.09	1.05	1
C* (mg/l)	5.1+0.16Co	3.5+0.053Co	1.5	0	0	1.5	0.02

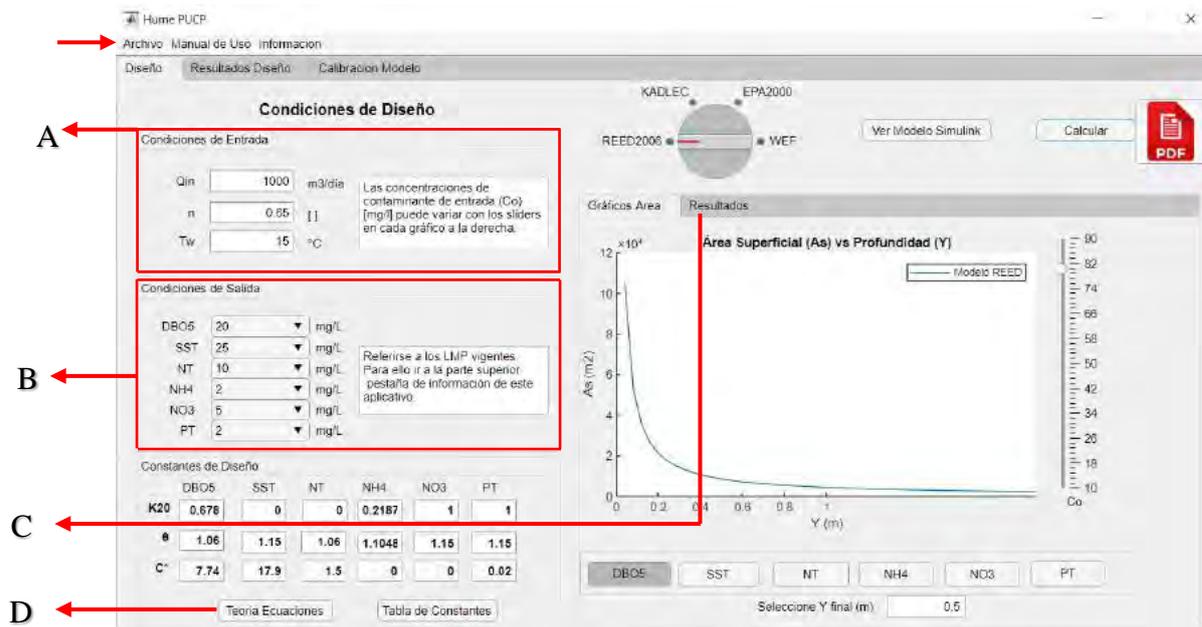
Pues dada la complejidad y diversidad de formas de diseñar un humedal; el tener una herramienta interactiva que permita en esta etapa analizar cada enfoque resulta de gran utilidad, más aún con herramientas visuales y automáticas se logrará interactuar entre las diversas metodologías y conseguir un diseño más atinado. Finalmente, a fin de validar la hipótesis de trabajo, se analizará si esta interacción y desarrollo eventualmente facilitan y mejorar el trabajo de diseño de un humedal sustancialmente.

#### 3.1.2 Implementación en App Designer

Pues bien, un análisis de sensibilidad paramétrico fácilmente puede ser conducido a través del aplicativo que cuente con modernas herramientas de interacción gráfica (*Graphical User Interface*). A continuación, se presenta una captura de pantalla de esta etapa de **Diseño** para mejor comprensión de lo expuesto.

**Figura 18.**

*Interfaz del aplicativo: La captura de pantalla muestra la parte de diseño que compone al aplicativo.*



*Nota: La integración tanto de metodologías a través del gadget, las constantes y contaminantes disponibles en la parte inferior derecha.*

**A:** En el lado izquierdo superior, se ha incorporado un resumen teórico del enfoque respectivo. En este caso se muestra la pestaña del modelo de la metodología **Reed2006**. Para ello se han colocado las ecuaciones involucradas para el modelamiento y junto a este, un pequeño resumen para guiar al usuario en cuanto a este enfoque respecta. Seguidamente, en la parte inferior a este resumen, se cuenta con un cuadro donde se deben indicar las constantes con las cuales se están trabajando.

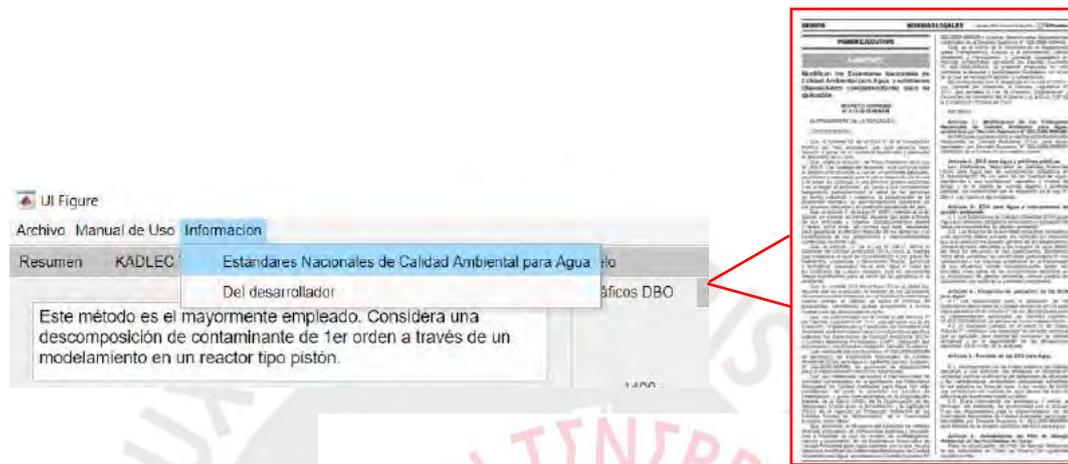
Estas constantes son de amplia discusión en la presente tesis ya que los valores que ahora se muestran son referenciales, pero no hay motivo alguno *a priori* para creer que estas constantes son universales y como tal son aplicables a cualquier proyecto. En la parte de **Mantenimiento** de este acápite se expone más a detalle cómo estos valores se van afinando conforme se va generando más información. Nótese que la pestaña mostrada corresponde a un solo contaminante, en este caso DBO<sub>5</sub>.

**B:** La variable  $C_e$  (Cexit) corresponde a la concentración de salida. Se espera que el usuario encargado del diseño tenga expectativas sobre la concentración de contaminante que sale. Estos usualmente siguen las normas vigentes de aguas vertidas. Para tal, por un lado pasando el *mouse* superficialmente se ve una burbuja de valores rápidos recomendables para distintos usos. Por un lado, puede que las aguas tratadas con los humedales deseen usarse para criaderos de peces o para irrigación, para lo cual rápidamente ya se cuentan con dichos valores. Los

valores han sido tomados de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua (D.S. N° 015-2015-MINAM). Asimismo, en la pestaña superior se ha adjuntado un botón que lleva a abrir el documento en formato PDF de la norma respectiva para su rápida consulta (Figura 19).

**Figura 19.**

*Shortcuts para acceso al documento sobre estándares de calidad de agua*



C: Esta pestaña de resultados corresponde a un resumen de los valores los cuales se fueron obteniendo a medida que el usuario va implementando el programa para distintas metodologías. A continuación, se muestra una captura de pantalla. La intención de esta pantalla es que el usuario observe y se perciba visualmente cuál es el área que va demandando por contaminante:

**Figura 20.**

*Resumen de áreas superficiales necesarias según la metodología de Reed 2006.*



*Nótese que no existen metodologías para los SST (Sólidos Suspendidos Totales) ni para NT (Nitrógeno Total).*

Luego, se han implementado en la parte inferior la profundidad seleccionada (Y) y su correspondiente área superficial. En suma, estos valores conformarán una cadena de datos que servirán para implementar el gráfico general (Resumen de Diseño).

**D:** Estos dos botones implementados corresponden a un resumen teórico de las ecuaciones que el programa está empleando para realizar sus cálculos.

Por un lado, la “Tabla de Constantes” corresponde a los valores referenciales que sugieren los autores de acuerdo a cada metodología. Estos son el eje principal de discusión de la presente tesis ya que estos valores corresponden a regresiones estadísticas bajo datos y valores de otros autores y regiones. El usuario podrá pulir estas constantes de diseño con el resto de herramientas que cuenta el aplicativo que más adelante se mencionarán.

El segundo botón sobre teoría de ecuaciones corresponde a un compendio de ecuaciones y metodologías por contaminante que los autores sugieren implementar. A continuación se muestra una captura de pantalla de las llamadas o *callbacks* que emplean estos botones.

**Figura 21.**  
*Resumen de las constantes sugeridas por autor.*

<b>HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL - TABLA DE CONSTANTES DE DISEÑO</b>						
<b>1.- Metodología Sherwood C. Reed</b>						
	<b>DBO</b>	<b>SST</b>	<b>NT</b>	<b>NH4</b>	<b>NO3</b>	<b>PT</b>
<b>K20 (m/año)</b>	0.678	-	-	0.2187	1	1
<b>θ</b>	1.06	-	-	1.1048	1.15	1.15
<b>2.- Metodología Kadlec y Knight</b>						
	<b>DBO</b>	<b>SST</b>	<b>NT</b>	<b>NH4</b>	<b>NO3</b>	<b>PT</b>
<b>K20 (m/año)</b>	34	1000	22	18	35	12
<b>θ</b>	1	1.065	1.05	1.04	1.09	1
<b>C* (mg/l)</b>	$3.5+0.053C_o$	$5.1+0.16C_o$	1.5	0	0	0.02
<b>3.- EPA/WEF MOP FD-16</b>						
<i>Tomar valores referenciales de 1.- Metodología Sherwood C. Reed.</i>						

**Figura 22.**

Resumen de ecuaciones empleadas por metodología o autor.

## RESUMEN METODOLOGÍAS PARA EL DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUPERFICIAL

### 1. Metodología Sherwood C. Reed

Este método es el mayormente empleado. Considera una descomposición de contaminante de 1er orden a través de un modelamiento en un reactor tipo pistón.

#### Modelos para DBO<sub>5</sub>, NH<sub>4</sub> Y PT

$$A_s = Q_n \left[ \frac{\ln \left( \frac{C_e}{C_o} \right)}{K_T y n} \right]$$

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{(-K_T t)}$$

$$K_T = K_{20} \Theta^{T_w - 20}$$

Ce	Concentración de salida (mg/l)	Θ	Constante de Temperatura II (-)
Co	Concentración de entrada (mg/l)	T <sub>w</sub>	Temperatura del agua (°C)
K <sub>20</sub>	Constante de Temperatura (d <sup>-1</sup> )	y	Profundidad del humedal (m)
Q	Caudal (m <sup>3</sup> /d)	n	Porosidad del humedal (-) [0,65 ~ 0,75]

#### Modelos para NO<sub>3</sub>

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp \left( \frac{-K_p}{CH} \right)$$

$$A_s = \frac{(b)(Q) \ln (C_o/C_e)}{K_p}$$

K <sub>p</sub>	Constante de Remoción (cm/d)	b	Factor de conversión [100cm/m]
CH:	Carga Hidráulica (cm/d)		

### 2. Metodología Kadlec y Knight

Este método es el mayormente empleado. Considera una descomposición de contaminante de 1er orden a través de un modelamiento en un reactor tipo pistón. El modelo se aplica a todos los contaminantes: DBO<sub>5</sub>, SST, NT, PT, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub> con sus respectivas ecuaciones (Ver tabla de constantes).

$$\frac{C_e - C^*}{C_o - C^*} = e^{\frac{-K_t}{CH}}$$

$$A_s = \frac{Q_o * 365}{K_t} \ln \left( \frac{C_o - C^*}{C_e - C^*} \right)$$

C*	Concentración de fondo (mg/l)	HLR	Carga Hidráulica (cm/d)
K <sub>t</sub>	Constante de Temperatura (d <sup>-1</sup> ) (ver Modelo Reed)		

### 3. Metodología WEF MOP FD-16

Modelo empleado por el Water Environment Federation de los Estados Unidos, Manual Of Practice (MOP). Modelos para Nitrógenos Totales y Amonio (NH<sub>4</sub>) respectivamente.

$$A_s = \frac{100 Q}{\exp[1,527 \ln(C_e) - 1,050 \ln(C_o) + 1,69]}$$

$$A_s = \frac{100 Q}{[0,645(C_e) - 0,125(C_o) + 1,129]}$$

$$C_e = 0,193(C_o) + 1,55 \ln(CH) - 1,75$$

$$C_e = \frac{(18,31)(C_o)(Q)}{A_s} - 0,16063$$

### 4. Metodología EPA 2000

Environment Protection Agency, igualmente alocada en los EEUU. Aplicable solo a la remoción de DBO<sub>5</sub>. El modelo asume una descomposición de la forma:

$$A_s = \frac{Q * t}{y * n}$$

$$\frac{C_e}{C_o} = \frac{1}{(1 + t * K_B)^N}$$

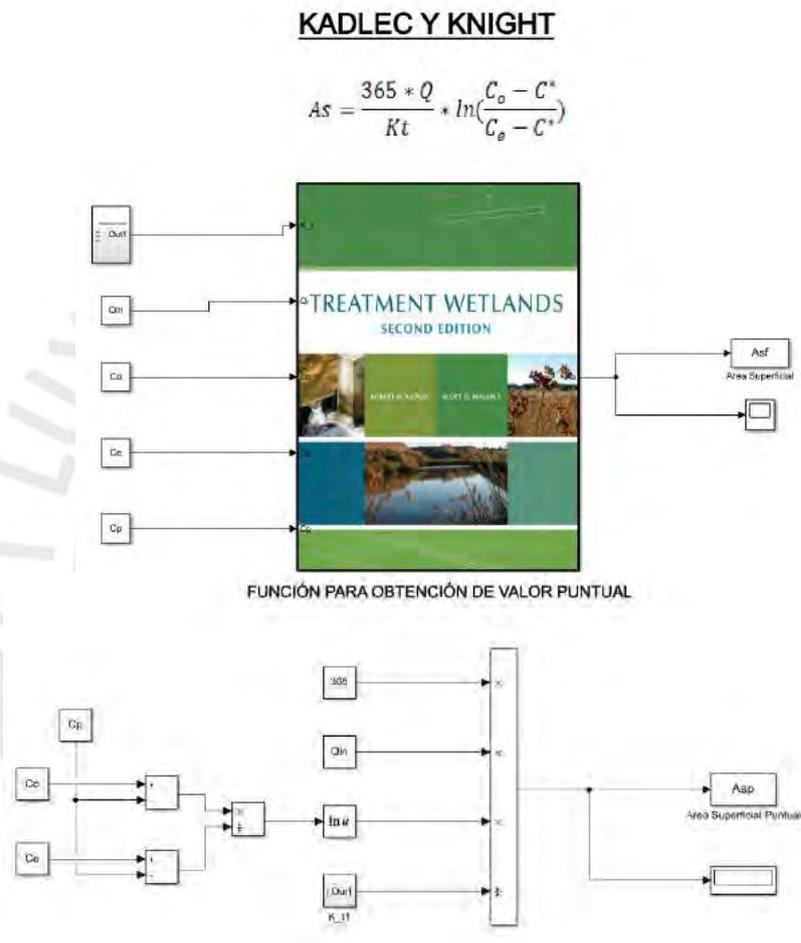
K <sub>B</sub>	Constante de Remoción (cm/d)	t	Tiempo de Retención Hidráulico [d]
----------------	------------------------------	---	------------------------------------

### 3.1.3 Implementación SIMULINK

Seguidamente se tiene el botón “*Ver modelo en SIMULINK*”. Este botón llama a Abrir la herramienta en SIMULINK. Esta herramienta permite una mejor visualización de los componentes de cada modelo. A continuación, se muestra el detalle (Figura 23):

**Figura 23.**

*Modelo en SIMULINK para el enfoque volumétrico de KADLEC & KNIGHT*



El modelo tiene dos campos importantes. El campo superior *Función para Gráfica* y el inferior *Función para valor puntual*. Ambos responden a una función en MATLAB de la ecuación propuesta por Reed para hallar el área superficial:

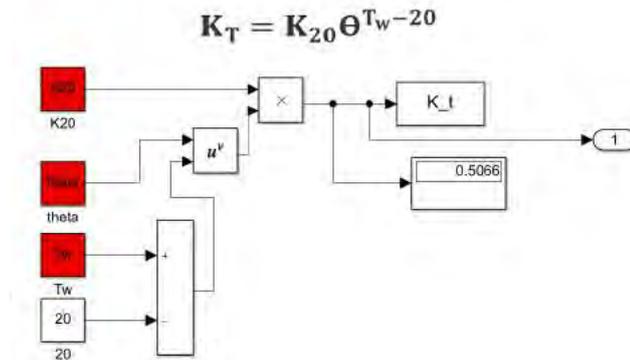
$$As = \frac{365 * Q}{Kt} * \ln\left(\frac{C_o - C^*}{C_e - C^*}\right) \quad (8)$$

**Función para Gráfica:** El campo superior sirve para evaluar la función en el tiempo y graficarlo, dado un valor de Y, evalúa el valor exacto del área superficial. Este último representa *la forma ideal* de trabajar con SIMULINK ya que el modelo se genera en este programa y se evalúa dentro de este, contrario al modelo que se tuvo que escribir en el mismo

MATLAB para generar los gráficos (se detalla más adelante). A continuación, se muestra cómo se modeló la temperatura dentro de **SIMULINK** como una ventana dentro de todo el modelo de Reed. Como se observa en la siguiente figura su comprensión es altamente intuitiva, motivo por el cual se optó por trabajar con este software.

**Figura 24.**

Modelo de la ecuación citada como una subventana del modelo de la Figura 23



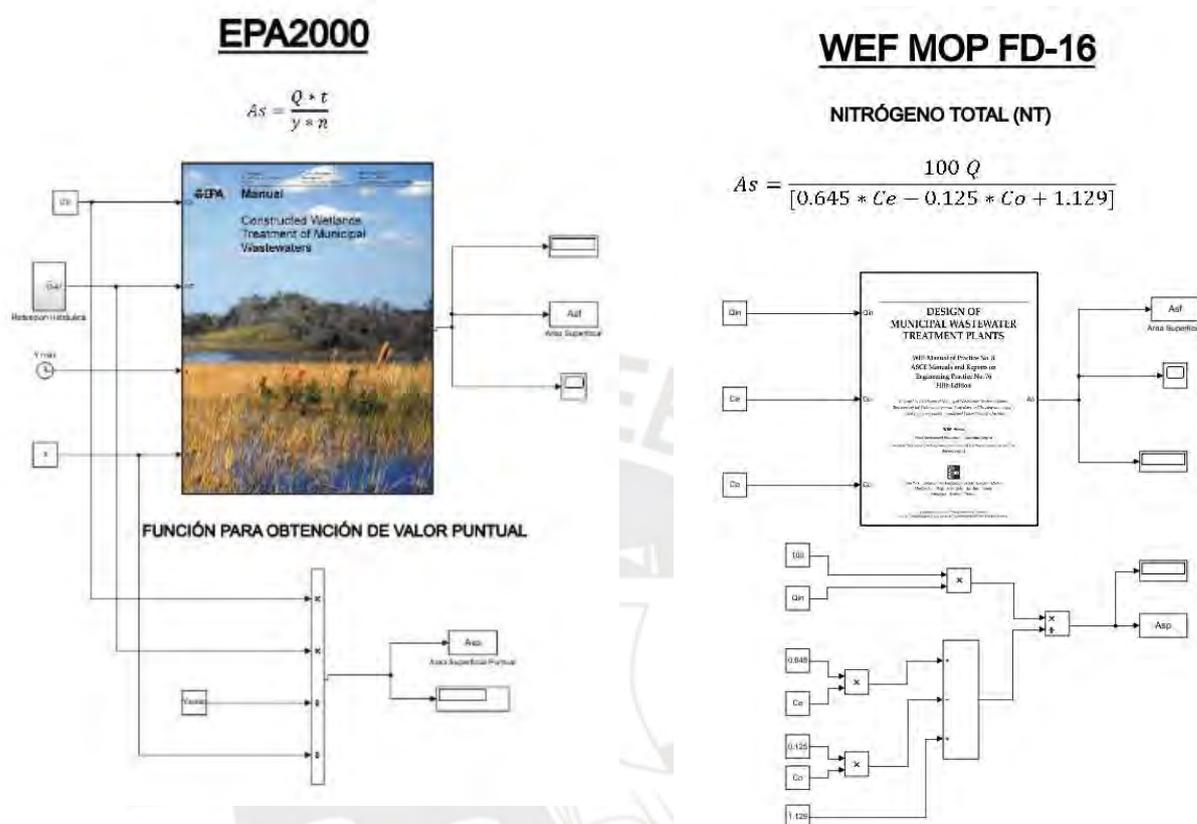
Luego, este modelo llama a una serie de constantes como se ven en la imagen. Se resaltan en rojo ya que todavía estás no han sido llamadas y por lo tanto no tienen ningún valor almacenado. Seguidamente, en lo que se refiere a la imagen de la portada del libro de Reed *et al* del modelo en SIMULINK, es importante citar la función en sí que se ha empleado.

```
function As= fcn(t,K_t,n,Qi,Ce,Co)
As=(1/t)*(1/K_t)*(1/n)*(Qi)*log(Ce/Co);
```

Esta es una solución alternativa que como autor he dado ya que son bastantes las variables que se llaman. Asimismo, esta variable es una “*función del tiempo*”. En realidad, la función de **As** como se ve en la ecuación 7 no depende de tiempo. Sin embargo, dado que se necesitaba esa función para crear un gráfico se ha visto por conveniente emplear *la variable tiempo* como la variable  $Y_{MÁX}$ , que corresponde a la profundidad del humedal. Es decir, para evaluar un modelo en SIMULINK, este usualmente se evalúa en función al tiempo. Como se desea evaluar varios puntos o posibles valores de “Y”, simplemente en vez de  $t$  se asume como Y la variable que se incrementa y para cada valor se obtiene un **As** (área superficial). Luego que el gráfico es generado el usuario puede interactuar con este y escoger la profundidad Y que: 1) requiera menor área y 2) a su vez un cambio de este no implique mucha variación (**análisis de sensibilidad**). Finalmente, para terminar de comprender el uso de SIMULINK, si se presiona el *gadget* y se da click en “ver modelo” se obtendrá las distintas metodologías con sus ecuaciones empleadas en cada simulación.

**Figura 25.**

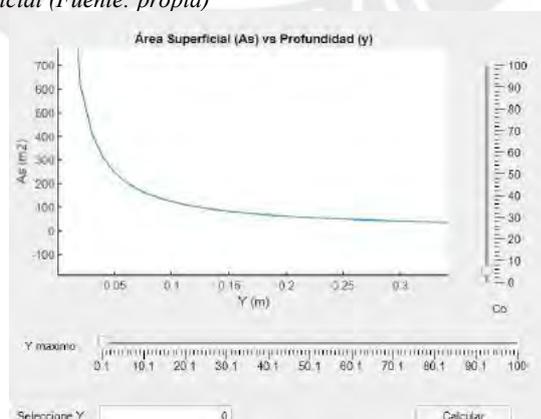
Recopilación de distintas metodologías empleadas en SIMULINK llamadas desde la interfaz principal de "Diseño" del aplicativo



Una vez que se explora la herramienta de SIMULINK se procede a evaluar los resultados de diseño. En la Figura 26 se muestra principalmente la variación de área superficial en función a la profundidad:

**Figura 26.**

Gráfica que resulta del modelo evaluado en SIMULINK para la obtención del área superficial (Fuente: propia)



**Gráfico:** Como se observa, hay dos *sliders* en la Figura 26. La de la derecha corresponde a la concentración de entrada  $C_o$ . Evidentemente este no es un valor fijo, y como parte de la interacción usuario-aplicativo, se desea comprender la influencia de variaciones pequeñas y

altas variaciones para el área superficial (nuevamente análisis de sensibilidad paramétrico). El *slider* inferior ya se mencionó anteriormente corresponde al valor de Y máximo que se cree tener. Este valor define el valor máximo el eje de las X en el gráfico. Analizando rápidamente el gráfico, este nos dice que a medida que crece la profundidad de diseño menor será el área superficial requerida. Cabe resaltar que siempre se debe apelar al criterio y/o experiencia del usuario ya que profanidades de diseño menores a los 40 cm son cuestionables y mayores a 1.5 m también. El gráfico nos indica que, por ejemplo, para las condiciones de la captura de pantalla, incrementar de 0.15 m a 0.30 (el doble) no tiene mayor requerimiento de área debido a que esta se “equilibra”.

### Consideraciones Técnicas:

- 1) Mediante la marcación del cuadro *callbacks* se puede permitir que MATLAB evalúe en tiempo real las variaciones que se están haciendo con el *slider*, de lo contrario cada vez que se mueve el *slider* se tendría que hacer *click* en el botón “calcular” para ver las modificaciones del gráfico. Este último es una importante consideración ya que permite fluidez con la interacción en el aplicativo. Más detalle se discute en la documentación en la parte de Anexos de este trabajo.

**Figura 27.**

*Callbacks para ejecución en tiempo real del movimiento del slider*



- 2) Por último, es importante resaltar las líneas de código más pertinentes en MATLAB que han sido de alta utilidad para implementar la interacción entre APP DESIGNER – MATLAB y SIMULINK.

**Figura 28.**

*Función assignin y simout para la asignación de variables al workspace o base en SIMULINK y simout como función de llamada para la ejecución de la simulación.*

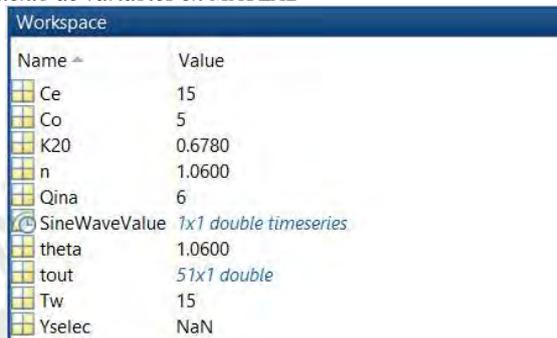
```
function CalcularButton_3Pushed(app, event)
%Asignamos primero Tw, theta, K20, n, Co y Ce respectivamente
assignin('base','Ce',str2double(app.CeDropDown.Value));
assignin('base','Co',app.CoSlider.Value);
assignin('base','Qina',app.QinaEditField.Value);
assignin('base','Tw',app.TwEditField.Value);
assignin('base','n',str2double(app.nEditField_2.Value));
assignin('base','K20',str2double(app.K20EditField_16.Value));
assignin('base','theta',str2double(app.thetaEditField.Value));

%valor puntual
assignin('base','Yselec',str2double(app.Yselec.Value));
r=app.Yselec.Value;

%Simulamos el modelo en Simulink con la función:
simout=sim('As','StopTime',num2str(app.YmaximoSlider.Value));
```

La primera línea hace referencia al almacenamiento de la variable en centro de trabajo de MATLAB. A este espacio formalmente se le denomina *workspace*. Los *workspace* son categorías importantes ya que nos permiten comprender qué es exactamente lo que MATLAB está almacenando y cómo lo está haciendo (qué tipo de variable es). Cuando el usuario corre el código puede ver fácilmente como las variables se van creando en MATLAB.

**Figura 29.**  
Almacenamiento de variables en MATLAB



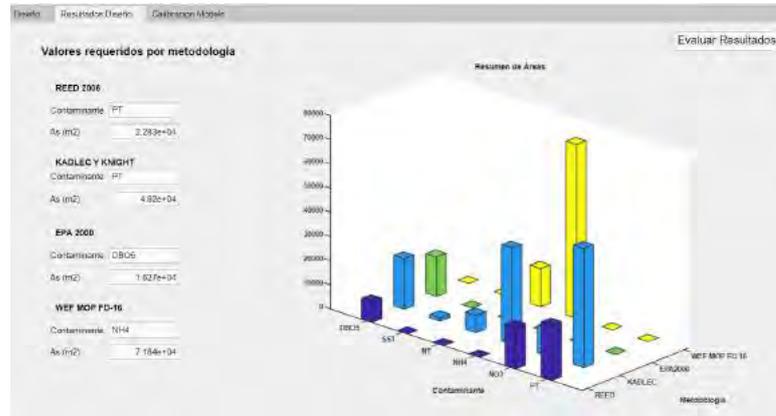
Name	Value
Ce	15
Co	5
K20	0.6780
n	1.0600
Qina	6
SineWaveValue	1x1 double timeseries
theta	1.0600
tout	51x1 double
Tw	15
Yselec	NaN

- 3) Finalmente, dentro de las consideraciones técnicas es importante resaltar cómo concebimos estas variables. Existen variables que pueden ser vectores, matrices, tensores, texto o números muy grandes. Cada tipo de información le corresponde una categoría. De no comprender la naturaleza de las variables con las que se está trabajando, MATLAB no las podrá leer ni mucho menos calcular lo pedido.

### 3.1.4 Resultados de Diseño

Finalmente, previo a una decisión sobre el área mínimo requerido a implementar el usuario puede observar una gráfica en 3D a modo de resumen de todas metodologías por contaminante. Asimismo, siguiendo el criterio, se sugiere al lado izquierdo aquellas áreas mínimas requeridas por metodologías. Se entiende que el área mínima corresponda al máximo área ya que de limpiarse el contaminante que requiere mayor dimensión el resto de contaminantes serán eliminados. Por último, cabe resaltar que MATLAB permite interactuar con dicho gráfico, así como exportar una captura de imagen de los gráficos que se obtienen con alta calidad. Dichas opciones se encuentran al lado derecho superior pasando el cursor.

**Figura 30.**  
Resumen de metodologías por contaminante (muestra de área superficial)

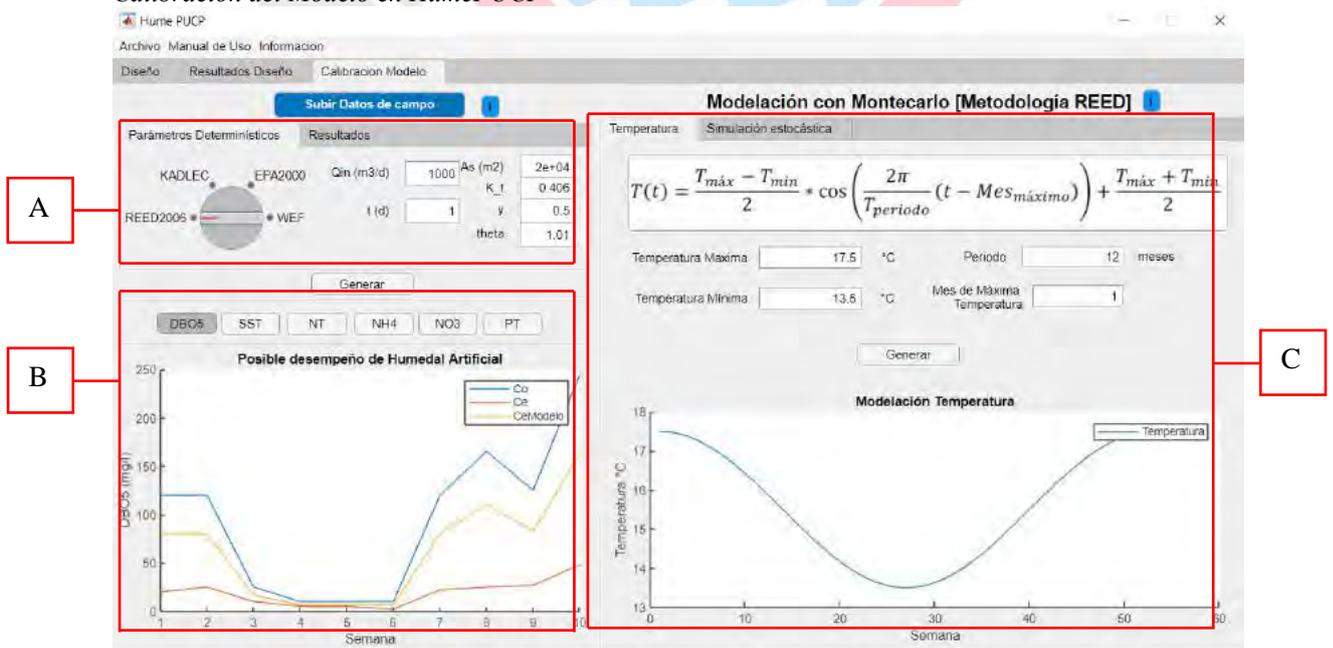


### 3.2 Mantenimiento y Calibración del Sistema:

Siguiendo las líneas de la implementación de un proyecto, la segunda etapa corresponde a hacer un seguimiento para poder observar la respuesta del sistema.

La medición objetiva de estos indicadores se hace exclusivamente a través del análisis de datos y evaluación de resultados a través de indicadores estadísticos como promedios, máximos, pruebas de hipótesis, gráficos, histogramas, etc. Este análisis se encuentra en la pestaña “Calibración del Modelo” dentro del aplicativo planteado. Ahora se discutirá a fondo cuáles son exactamente estos indicadores, su pertinencia.

**Figura 31.**  
Calibración del Modelo en HumePUCP



### 3.2.1 Apartado A: Datos de Entrada y Análisis Estadístico

En el marco de Metodología del Trabajo, dentro de la fase “Mantenimiento y Seguimiento del Proyecto de un Humedal” es importante resaltar lo siguiente: El apartado A de la Figura 31 se observan los datos de entrada que recogemos del paso anterior “Diseño de un Humedal”. El objetivo en este punto es tener una herramienta, a la cual, a través de iteraciones, podamos ir afinando los valores de diseño iniciales empleados ( $K_t$  y  $\Theta$ ). Para ello contamos con un “Knob” o perilla digital la cual nos permite cambiar dentro de cada tipo de metodología como el paso anterior.

Al igual que la sección anterior de **Diseño**, el botón **Generar** emplea los botones del apartado B para determinar qué contaminante se va a mostrar en el gráfico adjunto. Se se observa encima del apartado A, el botón “Subir Datos de Campo” nos lleva a una página de Excel donde, tras una recolección de datos de un humedal artificial, podemos colocar dichas mediciones. A continuación una captura de lo que es la hoja en excel que nos permite almacenar dichos elementos.

**Figura 32.**

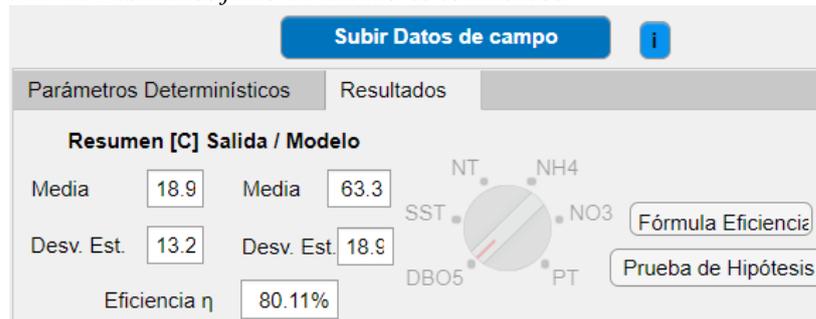
*Hoja en Excel pre-cargada para recolección de datos.*

FASE MANTENIMIENTO - HUMEDAL ARTIFICIAL				Proyectista:	UNITRAR
Fecha de muestreo:-				Profundidad de la toma de muestra (m):	-
Muestra tipo ENTRADA / SALIDA				Técnico especialista:	Ing. Yonatan Maldonado
				Entidad Responsable:	UNI
DBO [mg/l]					
#	MES	ENTRADA	SALIDA		
1	1	121.2	26.5		
2	2	185.0	10.0		
3	3	94.3	50.5		
4	4	84.3	18.7		
5	5	112.5	15.0		
6	6	54.0	14.0		
7	7	120.0	22.0		
8	8	165.5	25.0		
9	9	125.0	27.0		
10	10	244.5	48.0		

*Nota: Las hojas en la parte inferior donde se almacenan para los distintos contaminantes la información correspondiente.*

El ejemplo de la Figura 32 hace referencia a los datos recogidos del humedal del Ing. Yonatan Maldonado del proyecto de la UNITRAR. Estos valores son colocados manualmente y posteriormente MATLAB se encarga de leer todas las hojas del documento Excel correspondiente a todos los tipos de contaminante para los cuáles se puede diseñar y hacer seguimiento de nuestro humedal. Asimismo, el apartado A contiene la pestaña “Resultados” que no se detalla en la captura anterior:

**Figura 33.**  
Resumen de Resultados junto a indicadores estadísticos.



El lado izquierdo de la parte “**Resumen [C] Salida / Modelo**” hace un recuento de la media y desviación estadística de la muestra  $C_e$ . Al lado derecho, los mismos indicadores se muestran para los valores  $C_m$  calculados por la computadora.

### 3.2.1.1 *Midiendo la Eficiencia de un Humedal*

De la literatura se extraen algunas ideas previas para esta cuantificación. Al fin y al cabo, poder medir objetivamente la respuesta de nuestro humedal es clave para entender el resto de sus componentes y ajustar elementos si es pertinente. Por ejemplo, según (R. Kadlec & Wallace, 2008, p. 967) la eficiencia se puede medir como:

$$e_v = \frac{V_{active}}{(LWh)_{nominal}} \quad (9)$$

La fórmula 9 toma en consideración el volumen activo (el volumen de agua activo que se encuentra fluyendo) dentro del humedal, así como sus dimensiones nominales o teóricas. Si bien esta es una medición prudente la cual se aplica a cada humedal diseñado, quizá para generalizar esta medición podemos optar mediciones como a continuación se propone:

$$\eta = \left(1 - \frac{\overline{C_e}}{\overline{C_o}}\right) * 100\% \quad (10)$$

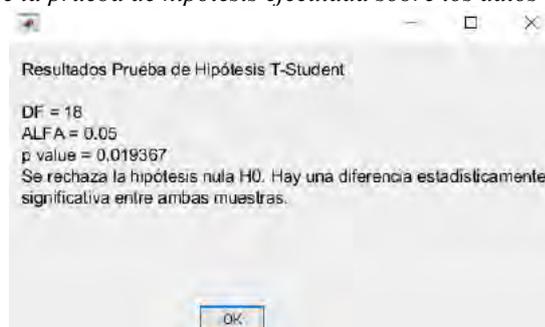
La ecuación 10 toma únicamente en cuenta los valores promedio del contaminante (Pt, NT, NH<sub>3</sub>, etc.) de entrada y del contaminante de salida; más no las dimensiones del humedal evaluado. Asimismo, usualmente en ingeniería se mide la eficiencia con la fórmula 10. Evaluando un extremo, idealmente la eficiencia de remoción será de un 100% cuando la concentración de salida ( $C_e$ ) sea muy pequeña y la división sea igual a 0. Este indicador “etha”  $\eta$  es de gran utilidad ya que trasciende las consideraciones físicas del humedal como son sus dimensiones, distribución de plantas, caudal de ingreso, etc. Así se puede comparar entre distintos proyectos de humedales con este indicador, motivo por el cual se incorpora en el aplicativo.

### 3.2.1.2 Prueba de Hipótesis

El botón “Prueba de Hipótesis” de la Figura 33 arroja el siguiente resultado:

**Figura 34.**

*Resultados de la prueba de hipótesis ejecutada sobre los datos medidos.*



Se ha aplicado una prueba de hipótesis sobre los valores de  $C_e$  y  $C_m$ . Como se destaca al inicio de este trabajo, nos interesa reducir la brecha entre los valores reales los cuales arroja el humedal y los valores computacionales con los cuales modelamos. Si los valores fueran muy distintos a los reales, indicaría que el modelo no es tan predictivo (preciso). La pregunta que acá se analiza es ¿Cuán parecidas son ambas curvas? Y de ser parecidas, cómo objetivamente podemos analizar dicha diferencia.

### 3.2.1.3 Justificación de una Prueba T-Student

Para ello existen las pruebas de hipótesis en estadística. En este caso, se ha empleado una prueba **T-Student** porque se desea evaluar la diferencia de medias, es decir, si estas son significativamente distintas estadísticamente. Solo con una observación visual no basta ya que este puede ser el resultado de una predicción aleatoria. Asimismo, es importante verificar ya sea visualmente o con una prueba de hipótesis si efectivamente las muestras evaluadas siguen una distribución normal y si las muestras son independientes para aplicar esta prueba parametrizada.

Dependiendo del tamaño de la muestra se puede asumir una distribución una distribución normal. En el escenario que las muestras sean grandes ( $n > 30$ ) y *a priori* se sabe que la distribución de la población sigue una distribución normal, además por el Teorema del Límite Central (TLC) se podría inferir la misma afirmación (Ghasemi & Zahediasl, 2012). En el caso de aplicar una prueba T-Student, se requiere al menos una corroboración visual (e.g. un histograma) de un comportamiento normal. Por otra parte, aunque parezca tentador, no se emplearía una prueba Chi cuadrada ya este tipo de pruebas se emplean para valores categóricos y para corroborar el ajuste de los datos. Sin embargo, los valores de contaminante medidos

son valores continuos y no categóricos en este escenario. Asimismo, la prueba no pretende evaluar el ajuste, sino ver cuán distinta es una muestra de la otra. Teniendo en mente lo expresado anteriormente, es necesario definir algunas consideraciones sobre las muestras que se emplean acá antes de aplicar una prueba T-Student.

#### **3.2.1.4 Consideraciones para ejecutar una prueba T-Student: Prueba de normalidad**

Las variables son continuas cuyo muestreo es **independiente** (los resultados de uno no influyen sobre otro). Por un lado, el grupo A proviene del muestreo “real” en campo mientras que el grupo B corresponde a las salidas determinísticas del modelo empleado. Se aplica una prueba *T-Student* para comparar si hay diferencia estadísticamente significativa de ambas medias correspondiente a cada muestra. Asimismo, se asume una distribución normal de estas.

Para definir este tipo de asunciones se debe visualizar *a priori* que la distribución de datos es normal. En su defecto, por el Teorema del Límite Central, se puede asumir que la distribución de datos es normal (El TLC nos indica que, si la población sigue una determinada distribución, una muestra con  $n > 30$  lo hará igualmente). Para ello, es necesario conocer la distribución de la población total, si fuera el caso.

Este apartado abre un espacio de discusión ya que los contaminantes evaluados; la temperatura, el caudal, DBO5, Pt, etc. siguen una distribución estadística diferente. Es por este motivo que la perilla en la Figura 33 está deshabilitada para el resto de contaminantes ya que de ejecutarse pruebas de hipótesis a todas las muestras implicaría que el aplicativo realice distintas pruebas de hipótesis bajo varias asunciones las cuales escapan los alcances de este trabajo. Asimismo, cabe resaltar los hallazgos respecto a la distribución que sigue cada contaminante es mezclada (“*mixed results*”). Es decir, la distribución de estos contaminantes está ligadas a la muestra de donde se recogen. A continuación, se muestran dichas pruebas que sostienen lo discutido.

**Tabla 11.**

La figura anterior son los resultados correspondientes a un análisis estadístico de la calidad de agua para el río Strymon River en Grecia ((Antonopoulos et al., 2001)

Variable	Distribution	Distribution parameters		$\chi^2$ -test		K-S-test D
				$\chi^2$	d.f.	
Q, m <sup>3</sup> sec <sup>-1</sup>	Weibull	$\alpha$ : 0.9955	$\beta$ : 76.269	2.635	4	0.0748
T <sub>s</sub> , °C	Normal	$\mu$ : 14.6545	$\sigma$ : 6.13597	36.9328	12	0.0755
ECw, $\mu$ S cm <sup>-1</sup>	Weibull	$\alpha$ : 6.43361	$\beta$ : 410.991	10.3065	9	0.0796
DO, mg l	Weibull	$\alpha$ : 7.31446	$\beta$ : 10.6215	11.0878	8	0.0542
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , me l <sup>-1</sup>	Gamma	$\alpha$ : 5.09018	$\beta$ : 5.12012	4.44135	3	0.07735
Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup> , me l <sup>-1</sup>	Weibull	$\alpha$ : 3.64018	$\beta$ : 0.79519	13.5527	7	0.119063
Mg <sup>2+</sup> , me l <sup>-1</sup>	Logistic	$\mu$ : 0.944792	$\sigma$ : 0.39549	9.34	2	0.08544
Ca <sup>2+</sup> , me l <sup>-1</sup>	Weibull	$\alpha$ : 5.88114	$\beta$ : 2.72124	9.476	8	0.07423
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mg l <sup>-1</sup>	Weibull	$\alpha$ : 3.07478	$\beta$ : 5.87368	6.8811	9	0.04016
TP, mg l <sup>-1</sup>	LogNormal	$\mu$ : 0.143282	$\sigma$ : 0.08597	15.389	4	0.092852

En la Tabla 12 se observan las distintas distribuciones estadísticas que mejor se aplican a los distintos contaminantes y variables que están involucradas en la medición de calidad de agua en el estudio del río Strymon, en Grecia. En particular, se observa la distribución que mejor aplica según estos investigadores para el DO (Oxígeno Disuelto) la cual sería una distribución de **Weibull**. Como se conoce, una distribución Weibull usualmente se aplica en la industria para la predicción de sistemas de falla mecánicos como lo es una fractura en un componente. Weibull modela apropiadamente lo que se denomina “mortalidad infantil” ya que al aparecer una fractura fácilmente el sistema es llevado a una falla. En el caso de la medición de calidad de agua, la tendencia implicaría que hay un gran número de valores “skewed” o sesgados con tendencia de la media hacia un lado. Finalmente, tener una distribución de Weibull implica que el estudio ya no es parametrizado y las pruebas de hipótesis a aplicar ya no serían las comunes como lo son una prueba *T Student* pareada, *T-Student* independiente, Análisis Factorial, ANOVA, etc.

Para el presente estudio es tentador extender dichos hallazgos e implementar una distribución Weibull para el DO (Oxígeno Disuelto) y por extensión a los valores de DBO<sub>5</sub>. Sin embargo, dicho contaminante no está asociado inherentemente a una sola distribución estadística. Para tomar una decisión respecto al mejor modelo que modela la distribución de DBO<sub>5</sub> se consideran otros hallazgos.

Por ejemplo, se han hecho pruebas de normalidad en una muestra de contaminantes de aguas residuales previas a un tratamiento por ósmosis inversa. Los resultados de prueba de normalidad de la tesis doctoral de Fabián Deniz Quintana, PhD. indican que las muestra siguen una distribución normal tras la aplicación de la prueba de normalidad Kolmogorov–Smirnov (Déniz Quintana, 2010). Finalmente, otro estudio que buscaba predecir la calidad de agua a lo largo de distintas estaciones en Europa demostró principalmente que no se tenía una distribución normal de datos (DBO<sub>5</sub>). Por ello, se transformaron los datos

logarítmicamente (lognormal) y se iteraron 1500 modelos con ayuda de indicadores de “goodness of fit” como lo es el *Kling-Gupta Efficiency* y el coeficiente de  $R^2$  para encontrar el mejor modelo (Vigiak et al., 2019). Finalmente, por simplificación e intención de permitir que este aplicativo sea empleado de forma práctica, se emplea una prueba de T-Student para los datos del  $DBO_5$  y no se aplican mayores pruebas de hipótesis al resto de contaminantes. Asimismo, la documentación del aplicativo viene acompañada de esta justificación para referencia del usuario.

### 3.2.1.5 Formulación de la Prueba de Hipótesis T-Student

La hipótesis nula corresponde a una reducción al absurdo. Deseamos evaluar si hay una diferencia estadísticamente significativa entre las dos muestras (la igualdad o superposición entre los datos medidos no se debe simplemente a un hecho aleatorio o fortuito). Luego se tiene:

*$H_0$ : No hay diferencia estadísticamente significativa entre las muestras (no se tiene suficientes pruebas para afirmar ello).*

*$H_1$ : Hay una diferencia estadísticamente significativa entre ambas muestras.*

En este caso, nos interesa que la predicción del modelo sea parecida con los datos medidos en campo, es decir que ambas muestras no sean muy distintas entre sí. De esta manera, decimos que no hay una diferencia estadísticamente significativa y tomaríamos  $H_0$ . Por ende, se podría inferir que el modelo empleado es predictivo. Formalmente en estadística esto no indica que “ambas curvas son iguales”, sino que como indica la prueba de hipótesis, no se encuentra evidencia suficiente para justificar que lo medido en campo en comparación a lo que arroja el modelo son muy distintos.

El nivel de significación para la prueba de hipótesis es de  $\alpha=0.05$ . Se aplica un nivel de significación de  $\alpha=0.05$  debido a un consenso en la academia. Sin embargo, para futuros estudios un valor de  $\alpha=0.025$  o inclusive  $\alpha=0.005$  denotaría mayor consistencia y rigurosidad en el estudio.

### 3.2.2 Apartado B: Gráficas

Una vez cargada nuestra hoja de valores como se observa en el apartado B, el aplicativo grafica dichos valores. Como se mencionó anteriormente en ese trabajo, principalmente nos interesa evaluar tres curvas.

La primera denominada  $C_0$  la cual corresponde al contaminante de entrada. La segunda  $C_e$  (o *Contaminant Exit*) la cual hace referencia a los valores medidos de salida. Teóricamente estos

siempre serán menores a los valores de entrada. Por último, se tiene  $C_m$  (*Contaminat Model*); el cuál es el pronóstico de nuestras fórmulas y ecuaciones empleadas para cada contaminante. A continuación, se presentan un resumen completo sobre las fórmulas empleadas en absolutamente cada metodología y cada contaminante:

**Tabla 12.**

*Resumen de las metodologías existentes por autor y por contaminante.*

METODOLOGÍAS POR AUTOR				
CONTAMINANTE	REED	KADLEC	WEF	EPA
DBO	✓	✓		✓
SST		✓		
NT		✓	✓	
NH4	✓	✓	✓	
NO3	✓	✓		
PT	✓	✓		

*Nótese la ausencia de metodologías por contaminante, así como el código de colores que se emplea para correlacionar con la Tabla 12.*

La Tabla 13 recoge a modo resumen todas las metodologías existentes y su correspondencia con los contaminantes a los cuáles estos aplican. Los espacios en blanco advierten una inexistencia de un modelo de contaminante para el autor correspondiente o una limitación. Este resumen responde al trabajo del ingeniero Jorge Rabat Blázquez (Rabat & Trapote, 2016). A continuación, se detalla aún más dichas metodologías:

**Tabla 13.**

*Resumen de ecuaciones empleadas por metodología.*

MODELO R1	MODELO W1
$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t}$ $A_s = LW = \frac{Q * \ln(C_o/C_e)}{K_T y n}$	$C_e = 0,193(C_o) + 1,55 \ln(CH) - 1,75$ $A_s = \frac{100 Q}{[0,645(C_e) - 0,125(C_o) + 1,129]}$
MODELO R2	MODELO W2
$\frac{C_e}{C_o} = \exp\left(\frac{-K_p}{CH}\right)$ $A_s = \frac{(b)(Q) \ln(C_o/C_e)}{K_p}$	$C_e = \frac{(18,31)(C_o)(Q)}{A_s} - 0,16063$ $A_s = \frac{100 Q}{\exp[1,527 \ln(C_e) - 1,050 \ln(C_o) + 1,69]}$
MODELO K	MODELO E
$\frac{C_e - C^*}{C_o - C^*} = \exp\left(\frac{-K_T}{HLR_A}\right)$ $A_s = \frac{365 * Q}{K_T} * \ln\left(\frac{C_o - C^*}{C_e - C^*}\right)$	$\frac{C_e}{C_o} = \frac{1}{(1 + t * K_B)^N}$ $A_s = \frac{Q * t}{y * n}$

*Nótese la correlación por código de colores con la Tabla 12.*

Al lado izquierdo de cada casilla de la Tabla 12 se observan los modelos para contaminante. Los modelos R1, R2, y K emplean principalmente PFRs como se señaló al inicio de este trabajo. El resto de metodologías emplea regresiones estadísticas y ajustes matemáticos de otro tipo. Al lado derecho se encuentran las ecuaciones de diseño para el área superficial. No todas las ecuaciones toman en cuenta las mismas variables. Por un lado, los más empleados como lo son los modelos de Reed y Kadlec emplean las constantes  $K$  y  $\Theta$ . Por otro lado, modelos como del WEP MOP FD-16 (*Water Environment Federation*) considera la carga hidráulica y más adelante la metodología del EPA200 toma en cuenta variables como número de humedales en paralelo.

Este proceso extenso de recoger metodologías e implementarlas computacionalmente es uno de los valores agregados de este aplicativo. A través de la interacción con los *Knobs* y *Gauges* (perillas gráficas) fácilmente podemos iterar entre estas constantes de diseño y sus metodologías para finalmente optimizar nuestro trabajo respecto al diseño e implementación de humedales.

### 3.2.3 Apartado C: Modelación Estocástica

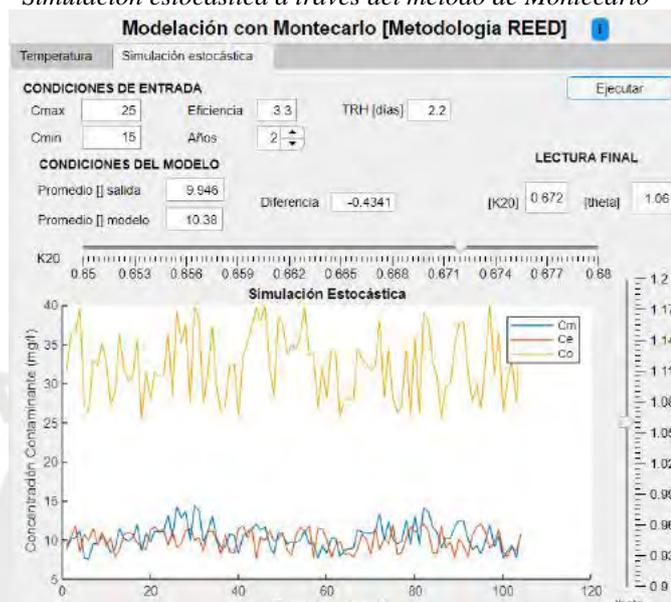
Como se ha discutido anteriormente en el presente trabajo, la naturaleza de la remoción de contaminantes de estos sistemas es de tipo estocástico, aleatorio con una incertidumbre intrínseca que lo acompaña. Para cerrar la brecha entre las mediciones reales y lo que los modelos determinísticos que calculan se ha implementado el enfoque estocástico. Se entiende así que el proyectista conoce *a priori* ciertas características del proyecto, o tiene bosquejos sobre qué esperar del agua a tratar (muy contaminada, contaminada, poco contaminada). Asimismo, el usuario conoce la zona de trabajo por lo cual se comprenden las tendencias de la temperatura.

Existe una extensa lista de variables que influyen en la remoción de contaminantes (crecimiento de plantas, sequías, fenómenos naturales como lluvias intensas, vientos fuertes, formación de algas, etc), hasta la fecha no se conoce la relación directa entre estas dada la revisión bibliográfica. Más solo se ha estudiado extensamente la implicancia de la temperatura sobre la capacidad de remoción. Dichos efectos se plasman en el uso de valores como  $K_{20}$  y  $\Theta$ . Para la simulación de este sistema, a través de generación aleatoria de valores, se toman estas constantes y se proyecta cual sería el comportamiento esperado.

Así, anteriormente, todos los modelos tomaban la variable tiempo como fija, ya sea a través de la carga hidráulica o el tiempo de retención hidráulico. Para el cálculo de este se fija un valor de tiempo (1 semana, 1 mes, etc). Asimismo, la temperatura tiene un valor puntual

( $T_w$ =temperatura del agua). Ahora, con la modelación a continuación se pretenda reducir dicha incertidumbre modelando para un tiempo  $T$  la concentración de salida de un humedal dada la concentración de entrada incluyendo la variación anual de la temperatura. A continuación, se muestra la siguiente figura con lo comentado:

**Figura 35.**  
*Simulación estocástica a través del método de Montecarlo*



La Figura 35 muestra el resultado de la modelación estocástica tomando en cuenta la incertidumbre de la contaminación del sistema. En la parte superior el usuario ingresa valores aproximados de las condiciones iniciales del agua, junto a la “eficiencia” y tiempo de retención hidráulicos aproximados. A continuación, se detallará como parte de la sección **Metodología del Trabajo** cómo se logran estas simulaciones, las cuáles son las ecuaciones empleadas y las asunciones tomadas.

### 3.2.3.1 Modelación de la Temperatura y Simulación estocástica

La asunción inicial es que la temperatura tiene una forma sinusoidal a lo largo del año tomando la temperatura promedio de un día. Así, en la primera pestaña de la Figura 35 “**Temperatura**” se procede a realizar el modelamiento con la siguiente ecuación:

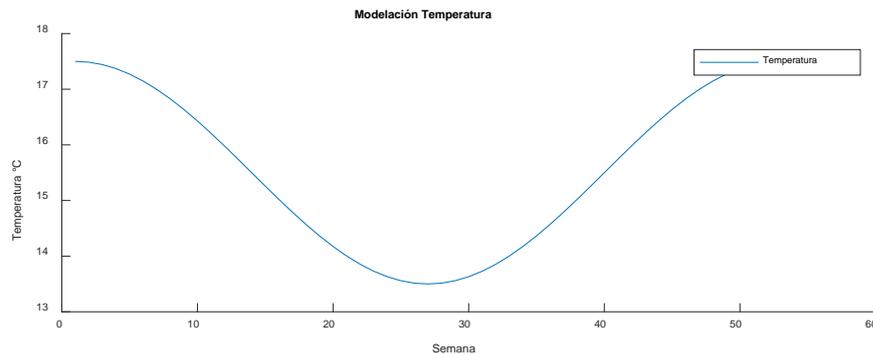
$$Temp(t) = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \cos\left(2\pi \frac{-t + MaxValue * 52/12}{Nsemanas = 52}\right) + \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (11)$$

El modelamiento está basado en la temperatura máxima ( $T_{max}$ ) y mínima ( $T_{min}$ ) así como el valor  $MaxValue$ , que corresponde al valor donde la temperatura presenta su pico más alto. Por ejemplo, para una zona como la sierra peruana su máxima temperatura aproximadamente se

encuentra en los meses de enero y febrero. Por otro lado, en otros lugares del mundo, como Europa, la temperatura la tendrá en los meses de Junio-Julio, es decir  $MaxValue=6$ . Luego, la segunda asunción es que un año tiene aproximadamente 52 semanas. Haciendo el cálculo preciso en realidad se tienen 52.1429, sin embargo, no se coloca el número exacto por efectos de modelamiento, iteración *for end loop*, así se considera que esta aproximación es prudente.

**Figura 36.**

*Resultado de la modelación de la temperatura en HumePUCP (MaxValue=1)*



Seguidamente, una vez que se almacenan los valores de temperatura, podemos emplearlos para simular las concentraciones de salida. Para ello, se han formulado las siguientes ecuaciones, siguiendo las recomendaciones de simulación estocástica hechas por el Kadlec y Knight en su obra *Treatment Wetlands* ((R. Kadlec & Wallace, 2008, p.163).

$$C_o(t = 1:T) = C_{max} + rand() * C_{min}; \quad (12)$$

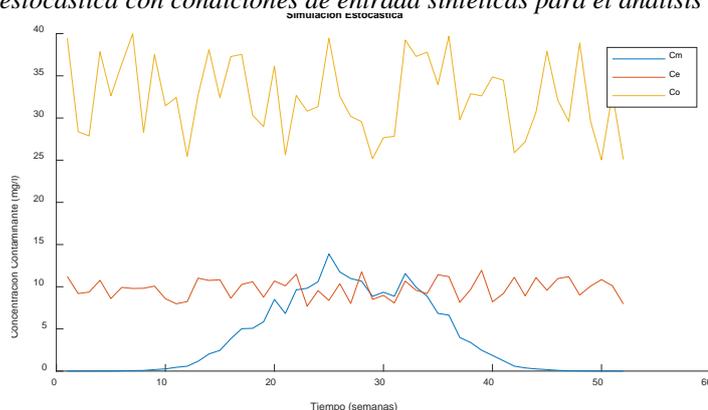
$$C_e(t) = (C_{maxi} + rand() * C_{mini}) / E_{factor}; \quad (13)$$

$$K(t) = K20i * \theta_i^{Temp(t)-20}; \quad (14)$$

$$C_m(t) = C_o(t) e^{-TRH * K(t)}; \quad (15)$$

Las concentraciones de entrada responden netamente a las asunciones hechas por el usuario sobre los máximos y mínimos que se vayan a presentar en la zona. La concentración de salida  $C_e$  responde otra asunción hecha por el usuario, bajo un efecto de un factor E, la concentración de salida se reduce. Finalmente, la concentración del modelo  $C_m$  incorpora para N años la variación de la temperatura. A continuación, se han exagerado las condiciones de entrada de la temperatura (Temp Max =50 °C y Temp Min=0°C) para analizar efectivamente cómo se está llevando a cabo la simulación:

**Figura 37.**  
*Simulación estocástica con condiciones de entrada sintéticas para el análisis del sistema.*



Como se observa la curva Cm (azul) existe una influencia significativa de la temperatura como era de esperarse. Asimismo, se superpone con la curva Ce la cual por las condiciones del modelo imita las condiciones los valores de Co, como es de esperarse.

Una vez comprendida la simulación ahora el usuario puede hacer uso del potencial del cálculo computacional para evaluar proyecciones anuales y emplear los *sliders* para iterar y hallar los valores de las constantes que acompañan estas ecuaciones. Por último, debe recalcar que la proyección solo responde a una ecuación de primer grado de descomposición exponencial (modelo PFR). Está sin duda es una limitación que más adelante se discute en el presente trabajo.

### 3.3 Implementación en Campo

Para concluir la etapa de metodología, a continuación, se explica cómo se realiza el proceso de implementación de un humedal artificial en Cusco (sierra peruana). Este proceso en campo, entre otras cosas permite:

1. Comprender las exigencias como usuario (ingenieros civiles, ambientales, o a fines) y construir este aplicativo cubriendo la mayoría de las exigencias.
2. Recolección de datos a través del respectivo seguimiento en campo para la calibración del modelo (ver resultados).

#### 3.3.1 Descripción del Caso

La implementación del proyecto se llevó a cabo en el distrito de Chincheros, en la provincia de Urubamba, departamento del Cusco. La provincia de Chincheros se

encuentra a una altura por sobre los 3200 msnm, ubicada en el kilómetro 28 al noroeste de la ciudad del Cusco.

**Figura 38.**

*Cosecha de Agua aledaña al terreno – coordenadas 13°25'25.47"S; 72°03'29.20"O (escala indicada en el inferior)*



El propietario, Don Antonio Quispe, desea implementar a futuro un proyecto de carácter ambiental con fines turísticos, como por ejemplo un posible criadero de peces. Conjuntamente, dentro de su terreno la municipalidad de Chincheros previamente en el año 2013 llevó a cabo la excavación de una poza a fin de recoger las aguas subterráneas y pluviales. Este proyecto, denominado *Cosecha de Agua*, tiene como fin servir de abastecimiento de agua para las plantaciones de la zona. Asimismo, una característica de la sierra son las constantes precipitaciones por lo que una cosecha de agua es altamente beneficioso.

**Figura 39.**

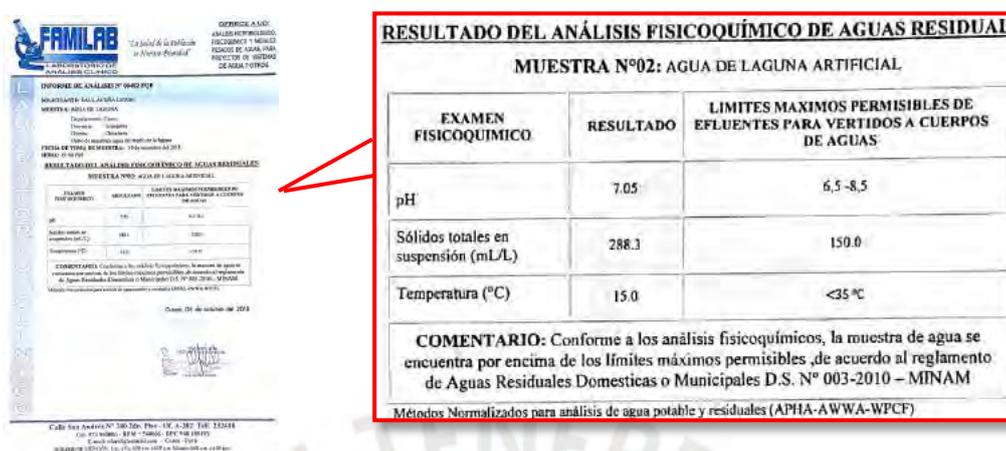
*Situación actual de cosecha de agua en Chincheros, Cusco.*



En este sentido, se ha visto la viabilidad de construcción de un humedal artificial aledaño debido a las facilidades con las que se cuentan tanto la iniciativa del propietario del terreno así como la fuente continua de agua. El proyecto adquiere mayor relevancia debido a los análisis de laboratorio que se recogieron de sus aguas.

**Figura 40.**

Resultados de Laboratorio de la Cosecha de Agua al 06 de Octubre del 2018

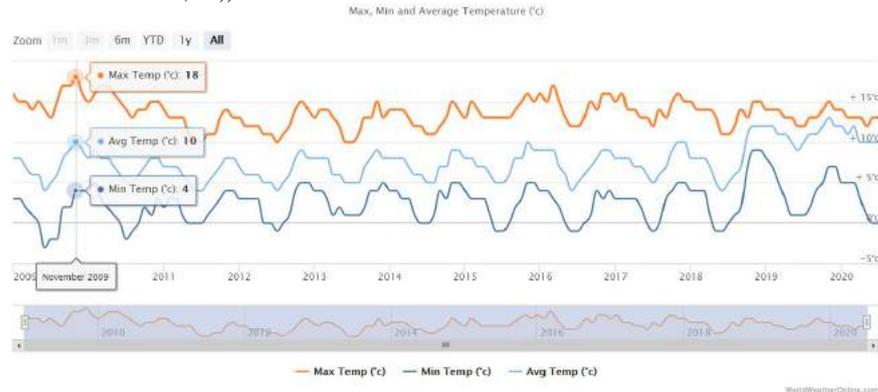


Como es de esperarse dichas aguas no cumplen con los reglamentos mínimos (D.S.N°0003-2010 – MINAM) de irrigación para cultivos ya que al menos en lo que respecta al contenido de coliformes termotolerantes estos están 2.1 veces encima de lo normado. Estos resultados confirman la necesidad de intervención del tratamiento de este tipo de aguas para un futuro uso, especialmente de riego de cultivos y proyectos como criadero de peces. También, aledaños a la zona yacen lagunas y humedales naturales que cuentan con plantas que se emplean típicamente en un humedal artificial como son los juncos o totora (*Juncus S.P.*), estas plantas serán finalmente los elementos cruciales que formarán parte del proyecto.

A la fecha, el fondo de la cosecha cuenta con 0.50 m de profundidad aproximadamente, por lo que se prevé que pueda llegar hasta los 1.50 m en temporada de lluvias. El presente proyecto de implementación de humedal cuenta con un canal hidráulico que toma las aguas de la cosecha de agua y las lleva hacia el proyecto en mención. Dicha implementación se hace a través de un vertedero triangular previamente estudiado y el cual a través de una regresión lineal fácilmente se puede medir el caudal de ingreso. Asimismo, el mismo vertedero se instala en la salida del proyecto para medir el caudal de salida de la forma más aproximada posible.

Luego, se ha previsto implementar un humedal de tipo de flujo superficial debido a su atractivo turístico y ecológico al tener el agua al aire libre. Finalmente, una vez realizado el trabajo se prevé que el mantenimiento y gestión del mismo este a cargo del dueño del terreno. Las temperaturas de la zona máximas y mínimas se resumen en la presente imagen:

**Figura 41.**  
 Pronóstico de la temperatura y lluvia en aproximadamente 10 años en la provincia de Urubamba, Dpto. Cusco  
 (Fuente: (WorldWeatherOnline, s/f))



Se observa que en ningún caso se llega a valores negativos de la temperatura, lo cual es alentador ya que el humedal seguiría trabajando aún en invierno. Asimismo, se cuenta con la información respecto a la distribución de precipitaciones pluviales las cuales serán importantes conocer para la modelación en el software.

### 3.3.2 Diseño del Proyecto

#### 3.3.2.1 Materiales (componentes)

<p><b>Geomembrana:</b></p> <p>De polietileno de alta densidad HDPE de ancho de 1.0 mm</p>	
<p><b>Vertedero de concreto y aluvón para medición:</b></p> <p>Se tomaron 2 cajas de registro para desagüe de 4" y sobre un solado de cemento se instaló el pequeño vertedero. Luego, se empleó un pedazo de aluvión con medidas establecidas para a través de una simple referencia o regla marcada en el sistema se mida periódicamente el caudal tanto de ingreso como de salida.</p>	
<p><b>Vegetación empleada:</b></p> <p>También conocido como juncos de agua, se trasladaron desde los humedales naturales aledaños hacia el proyecto. Científicamente conocido con el nombre <i>Scirpus Lacustris</i>.</p>	

<p><b>Otros:</b> Tubería de PVC para la redirección del flujo desde la cosecha de agua, tuberías para la distribución uniforme del flujo, tapas de PVC, pegamento, etc. (Fotografía al 03 de Marzo del 2019).</p>	
---	--

### 3.3.2.2 Metrados y Presupuesto

Se ha realizado un presupuesto acompañado del análisis de costos unitarios. Los detalles se encuentran en ANEXO II-Implementación en Campo. A continuación, se muestra el presupuesto final.

**Figura 42.**  
Presupuesto humedal artificial HumePUCP

<b>Resumen del Presupuesto</b>		
<i>Proyecto</i>	PRESUPUESTO FINAL - HUMEDAL ARTIFICIAL CHINCHERO - TESIS PUCP	
<i>Cliente</i>	RAUL SEBASTIÁN ACUÑA LETONA	
<i>Departamento</i>	CUSCO	
<i>Provincia</i>	URUBAMBA	
<i>Distrito</i>	CHINCHERO	<i>Costo a :</i> <b>Junio - 2019</b>
<u>Item</u>	<u>Descripción Sub presupuesto</u>	<u>Costo Directo</u>
01	PRESUPUESTO FINAL - HUMEDAL ARTIFICIAL CHINCHERO - TESIS PUCP	4,800.90
<b>SUB TOTAL COSTO DIRECTO</b>		<b>4,800.90</b>
	<b>Mano de Obra</b>	2,106.73
	<b>Materiales</b>	2,161.47
	<b>Equipo</b>	532.70
	<b>COSTO DIRECTO</b>	<b>4,800.90</b>
	<b>GASTOS GENERALES</b>	<b>10 % 480.09</b>
	<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>	<b>5,280.99</b>
<b>Son : CINCO MIL DOSCIENTOS OCHENTA CON 99/100 NUEVOS SOLES</b>		

### 3.3.3 Regulación y medición del Caudal

La cosecha de agua contaba con tubería al costado lateral que daba hacia la construcción del humedal (Ver ANEXO 2 – Planos). Gracias a esta tubería (ver Figura 43) y en función de cantidad de agua con la que contaba la cosecha mencionada se midió el caudal periódicamente.

**Figura 43.**

*Dispositivo para la medición del caudal – válvula*



Luego, en la entrada y salida con la colocación de dispositivos de medición como los vertederos triangulares (ver Figura 43 ) se hace primero el ajuste estadístico del coeficiente  $C_d$  para de forma práctica posteriormente solo medir la altura del tirante y hallar la altura del caudal. A continuación, se detalla dicho procedimiento.

**Figura 44.**

*Implementación de dispositivo para la medición de caudal*



Inicialmente se deja correr el agua a través de la compuerta inicial, dejando caer el agua desde la cosecha. Luego, con un recipiente se mide el tiempo que demora en llenarse este recipiente controlado. Se empleó un recipiente de 4 litros y se midió el tiempo para hallar el caudal real.

Luego, el caudal teórico para vertederos triangulares (Chereque Moran, 1987) está definido por la ecuación:

$$Q_t = \frac{8}{15} * \sqrt{2g} * \tan \frac{\theta}{2} * H^{\frac{5}{2}} \quad (16)$$

Donde H es la altura del tirante (ver Figura 44) y en ángulo  $\Theta$  es la intercepción del vertedero. Para este caso se perfiló para un grado de  $90^\circ$ . Luego, con los tirantes medidos de la evaluación del caudal real se procede a hallar el factor de ajuste **Cd** de la forma:

$$Cd = \frac{Q_{real}}{Q_{teórico}} \quad (17)$$

Así, la ecuación 15 queda expresada en función de H y el caudal real de la forma:

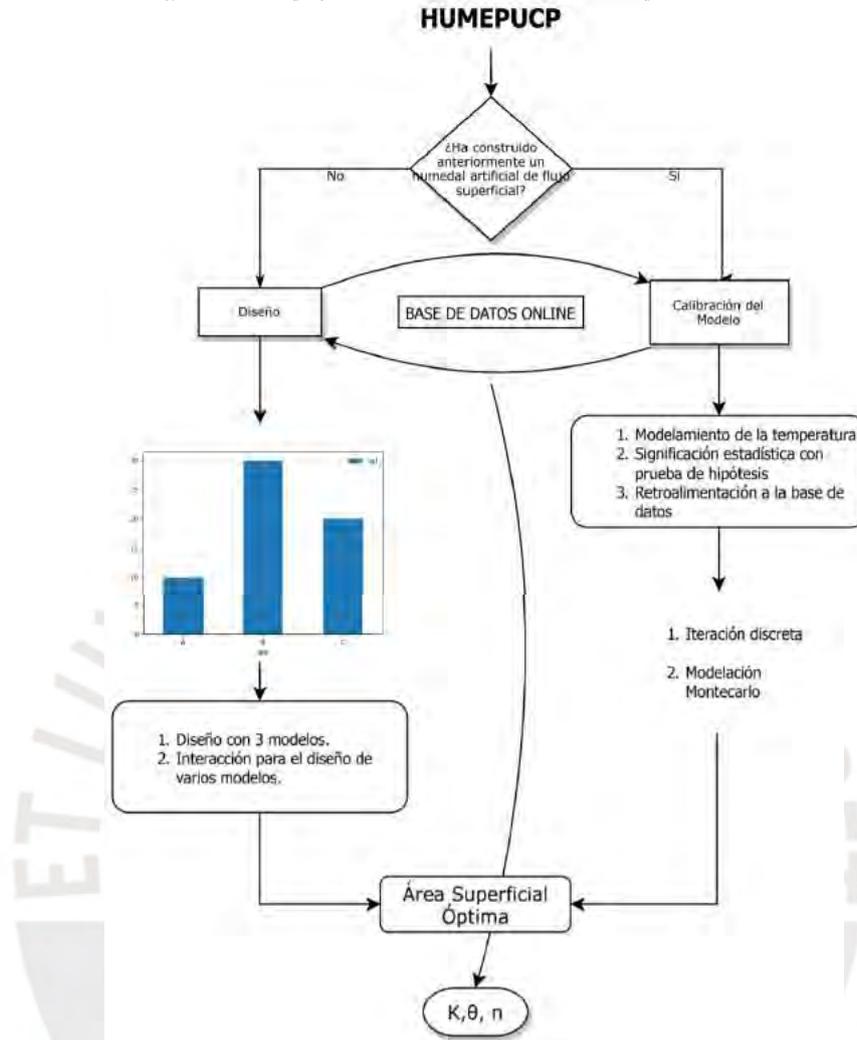
$$Q_{real} = 2.36 * C_d * H^{\frac{5}{2}} \quad (18)$$

Esta ecuación permitirá hacer lectura rápida del caudal circundante en las visitas periódicas al proyecto.

## 4 RESULTADOS

La presentación de resultados sigue la trayectoria de un trabajo en ingeniería. En un primer plano, el especialista diseña el sistema con asunciones iniciales. Si el profesional cuenta con referencia de proyectos anteriores (experiencia) puede incluir valores más precisos para un diseño eficiente. Si ese no fuera el caso, haciendo igualmente uso del aplicativo procede a hacer un seguimiento o calibración del modelo a fin de obtener mejores constantes de diseño. Este proceso se facilita porque el usuario ya cuenta con referencia de proyectos locales; así con la simulación estocástica al final de este proceso obtiene constantes de diseño más eficientes optimizado su trabajo. Al final para corroborar sus resultados el aplicativo HumePUCP nos permitirá imprimir un reporte y ejecutar una sencilla prueba de hipótesis para sustentar lo hallado. Dicho proceso se plasma en la Figura 45. Idealmente en el futuro con la acumulación de proyectos se generará una 'Base de Datos' para nutrir aún más el trabajo con humedales artificiales. En este sentido, este mismo proceso se simula a medida que se presentan los resultados a continuación.

**Figura 45.**  
Diagrama de Flujo para el diseño de un humedal artificial en HumePUCP



#### 4.1 CON EL APLICATIVO: DISEÑO ÓPTIMO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL CON HUMEPUCP

*A priori* se hizo una medición respecto a los contaminantes y la calidad de agua encontrada en la zona. Estos valores definen los valores de inicio para empezar un diseño. Asimismo, el reporte generado por el laboratorio FAMILAB en esta primera medición incluyó los LMP vigentes a la fecha. A continuación, se muestran dichos resultados:

**Tabla 14.**  
Resumen de calidad del agua encontrada – Distrito Chincheros

CONDICIONES INICIALES					
<b>SST ENTRADA</b>	288.3	mg/l	<b>SST salida -ECA</b>	<100	mg/l
<b>DBO<sub>5</sub></b>	50	mg/l	<b>DBO<sub>5</sub> salida - CA</b>	10	mg/l
<b>T</b>	10	[°C]			
<b>CAUDAL</b>	<b>5.71</b>	m <sup>3</sup> /d			
<b>N MANNING</b>	0.65	[ ]			

El informe completo se encuentra en Anexos II – Implementación en Campo. Los resultados indican que existe una contaminación por Coliformes Termotolerantes. Evidentemente, esto se da debido a la presencia de aves que yacen en las orillas de la cosecha de agua. Asimismo, la presencia de sólidos suspendidos totales indica la necesidad de un tratamiento del agua. No se cuentan con mediciones de OD o DBO<sub>5</sub> para esta muestra, esto debido a las limitaciones técnicas del laboratorio FAMILAB. Tomando en cuenta estos datos se procedió a elaborar el diseño del humedal artificial. Se procede a diseñar el humedal artificial tomando como referencia la contaminación por SST – OD/DBO<sub>5</sub>.

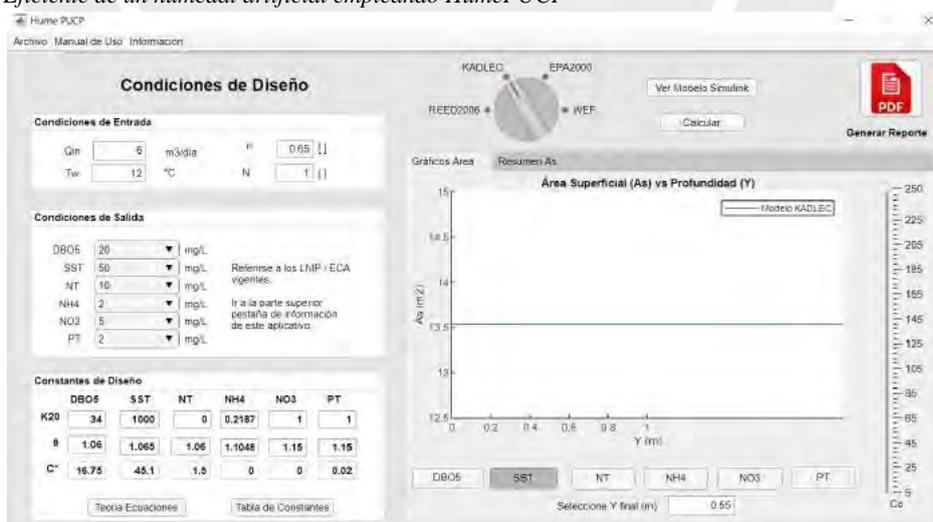
**Tabla 15.**  
*Constantes de diseño para el humedal artificial en Chincheros, Cusco.*

Remoción de SST					
Datos de Entrada			Datos de Salida		
K20	1000	d-1	$\Theta$	1.065	[ ]
C*	34.7	m/l			

*Nota: Los números empleados siguen las sugerencias de la metodología de Kadlec y Knight*

A continuación, se muestra una captura de pantalla del ingreso de las tablas mostradas anteriormente para la metodología de Kadlec y Knight sobre el indicador SST. Nótese estas asunciones iniciales, principalmente las constantes de diseño:

**Figura 46.**  
*Diseño Eficiente de un humedal artificial empleando HumePUCP*

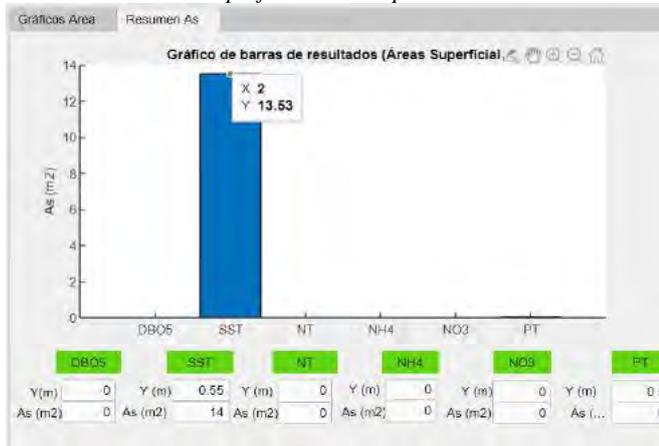


*Nota: La captura corresponde al enfoque en la Metodología KADLEC para la remoción de SST (<50 mg/l) con una concentración de entrada mayor a 250 mg/l SST*

Dada la falta de experiencia con esta metodología y conocimiento de proyectos aledaños quienes en base a su experiencia puedan sugerir otras metodologías o constantes de diseño se toman aquellas las cuales el autor indica como referencia. Así, según la lectura de resultados

el área sugerida deberá ser aproximadamente 15.0 m<sup>2</sup>. A continuación una captura de la pestaña **Resumen As** del aplicativo:

**Figura 47.**  
Resultados de área superficial mínima para la remoción de SST.



Asimismo, Kadlec y Knight es el único enfoque dentro de las 4 metodologías consideradas en este aplicativo que tiene un modelo para este indicador de calidad de agua (SST). Nótese que el gráfico es una línea debido a que la ecuación de Kadlec y Knight no considera la profundidad 'y' en sus cálculos.

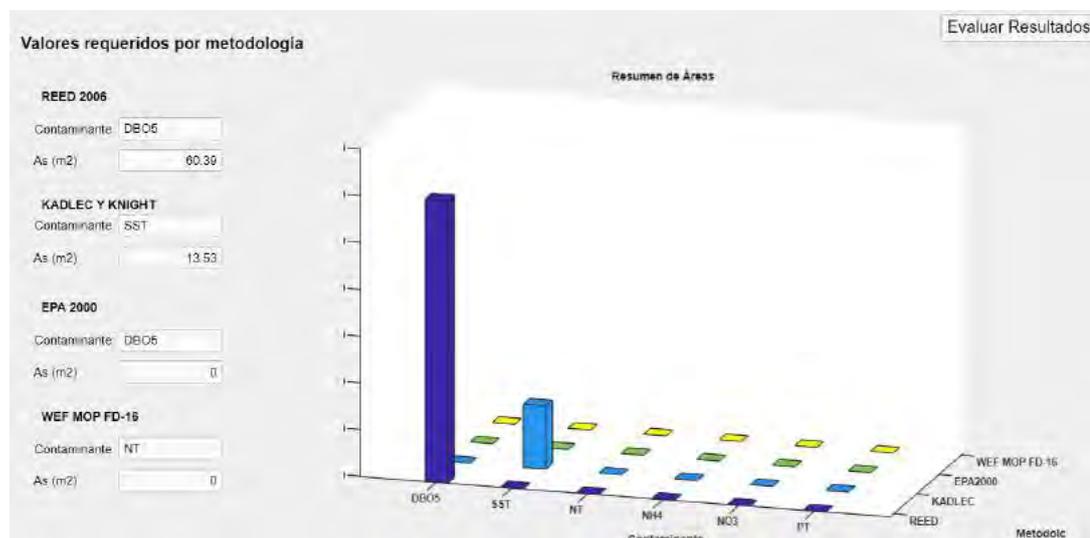
Por último, se presentarán los diseños en función al contaminante de DBO<sub>5</sub> como referencia haciendo unas asunciones generales. Con una proyección de concentración de salida de 15 mg/l (mínimo para el vertedero en ríos) y una concentración de entrada que oscilan los valores entre 40 mg/l y 50 mg/l se tienen:

**Figura 48.**  
Empleo del aplicativo para el diseño del humedal Chincheros – Cusco. Metodología de Reed



**Figura 49.**

Resultados del diseño – Metodologías Reed y Kadlec para  $DBO_5$  y SST.



Evidentemente de contar con más indicadores de contaminante, ya sean PT (Fósforo), NT (Nitrógenos totales), NO<sub>3</sub> (Nitratos), NH<sub>4</sub> (Amonio) el aplicativo está listo para abarcar tales consideraciones. Aun así con lo trabajado ya se observa que hay una demanda de hasta 4.5 veces menos de área superficial por la metodología de Kadlec y Knight para SST frente a los  $13.53 \approx 60.39$  m<sup>2</sup> de DBO<sub>5</sub> en el caso de Reed. Por ello, se ha optado finalmente emplear un área superficial de **14.0 m<sup>2</sup>** (3.5m × 4.0m) en función a Kadlec y Knight. Las condiciones finales de diseño se presentan en la Ficha Técnica generada por HumePUCP, tal y como se detalló en la metodología de trabajo:

**Figura 50.**  
 Ficha técnica generada por HumePUCP con los detalles de diseño del humedal en Cusco



## Ficha Técnica - HUMEPUCP

---

### DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

**Resumen:** Implementación de un humedal artificial de flujo superficial para la remoción de contaminantes provenientes de una cosecha de agua en la localidad de Chincheros, Provincia de Urubamba, Cusco.

<b>Nombre del Proyecto:</b>	Humedal Artificial Chincheros, Cusco	<b>Tipo:</b>	Humedal Artificial de Flujo Superficial
<b>Encargados:</b>	Raúl Acuña Letona	<b>País:</b>	Perú
<b>Ubicación:</b>	Chincheros, Urubamba, Cusco,	<b>Fecha:</b>	05/03/2019
<b>Departamento:</b>	Cusco		

---

### DETALLES TÉCNICOS

<b>Modelo:</b>	Kadlec y Knight,	<b>Rugosidad de Manning (n):</b>	0.45
<b>Área Superficial (As):</b>	14.0 m <sup>2</sup>	<b>Contaminante de mayor relevancia:</b>	SST, DBO
<b>Profundidad de diseño:</b>	0.55 m		
<b>Caudal de ingreso:</b>	6 m <sup>3</sup> /d		

---

### CONSTANTES DE DISEÑO

<b>K<sub>20</sub>:</b>	1000
<b>Θ:</b>	1.065
<b>Temperatura Promedio (°C):</b>	15 ° C

*Nota: En caso desee aportar a la base de datos de humedales artificiales en el Perú, enviar su ficha técnica a [raul.acuna@pucp.edu.pe](mailto:raul.acuna@pucp.edu.pe)*

## 4.2 RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN EN CAMPO – CHINCHEROS, CUSCO

### 4.2.1 Medición del caudal

En primer lugar, se hizo un seguimiento al flujo constante de agua (caudal) que se tuvo durante la experiencia en campo, meses de marzo hasta fines de setiembre del 2019. Se muestran los resultados siguiendo las consideraciones especificadas la metodología de trabajo.

Para la calibración inicial ejecutada una vez implementado el sistema se tiene:

Volumen (l)	Tiempo s	Qreal (Aforo Vol.) (lps)	H (cm)	Qteórico (lps)	Cd (Real/Teórico)
4.0	42.06	0.095	2.10	0.151	0.630
4.0	42.05	0.095	2.20	0.170	0.561
4.0	40.09	0.100	2.30	0.190	0.526
4.0	38.90	0.103	2.00	0.134	0.769
				<b>Promedio Cd</b>	0.62169

Luego se emplea **Cd** como:

<b>Cd promedio</b>	0.62169
--------------------	---------

El flujo mostrado a continuación no es bastante por lo que la sensibilidad de parámetros puede arrojar valores extremos que no se asemejen a la realidad. Para ello, de acuerdo al autor inicial de tanto la fórmula empírica y teórica sugiere que en la práctica Cd suele oscilar entre valores de 0.6 (Chereque Moran, 1987, p. 94). Por ello, se infiere que las mediciones hechas a futuro tienen confiabilidad. Luego, la ecuación 17 mencionada en la metodología de trabajo quedaría definida como:

$$Q_{real} = 1.468 * H^{2.5} \quad (19)$$

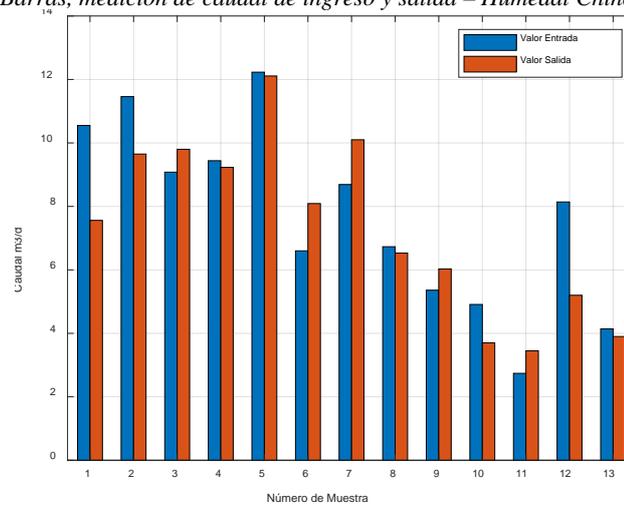
Luego, en cada visita solamente se ha remitido a medir la altura del tirante y en gabinete se pudo calcular el caudal como se muestra a continuación:

**Tabla 16.**

*Recolección de tirantes y medición de caudal – humedal Chinchero*

<b>Medición Caudal Humedal Chincheros</b>						
	Fecha	H(cm) E	H(cm) S	Caudal E (m3/d)	Caudal S (m3/d)	
<b>1</b>	15-Mar	2.4	1.8	10.55	7.56	
<b>2</b>	30-Mar	2.4	1.5	11.46	9.65	
<b>3</b>	13-Abr	2.2	1.9	9.08	9.80	
<b>4</b>	25-Abr	2.2	1.8	9.44	9.23	
<b>5</b>	5-Jun	2.5	2.4	12.23	12.11	
<b>6</b>	29-Jun	1.9	1.5	6.60	8.09	
<b>7</b>	1-Jul	2.2	2.3	8.69	10.10	
<b>8</b>	17-Jul	1.9	1.8	6.73	6.53	
<b>9</b>	22-Jul	1.8	1.8	5.36	6.03	
<b>11</b>	15-Ago	1.7	1.6	4.91	3.70	
<b>12</b>	4-Sep	1.4	1.3	2.74	3.45	
<b>13</b>	8-Sep	1.5	1.0	8.14	5.20	
<b>15</b>	19-Sep	1.1	1.0	4.14	3.90	

**Figura 51.**  
Gráfica de Barras, medición de caudal de ingreso y salida – Humedal Chincheros, Cusco



Se observa un decrecimiento en el caudal de ingreso. Estos resultados junto a las mediciones hechas por el laboratorio se discuten al final de este sub acápite.

#### 4.2.2 Seguimiento a la implementación en campo – Humedal Artificial Chincheros - Cusco

El humedal se fue implementando progresivamente a inicios de marzo del 2019 y se fue adecuando el traslado de plantas hasta mediados el mes de junio. Es en el mes de junio donde se empieza el registro de calidad de agua por los meses desde junio hasta setiembre obteniendo así un total de 14 muestras. El registro se hizo gracias al apoyo del SYNERGIA Consultores Ambientales E.I.R.L. en la ciudad de Lima por lo que el traslado de muestras se hizo llegar hasta Lima para su análisis.

**Figura 52.**  
Análisis de muestras – Humedal Artificial – Junio 13 del 2019



A continuación, se muestran uno los resultados de la medición, así como el resumen de estos. En la parte de Anexos II – Implementación de Campo se encuentran los resultados completos entregados por SYNERGIA.A2WE

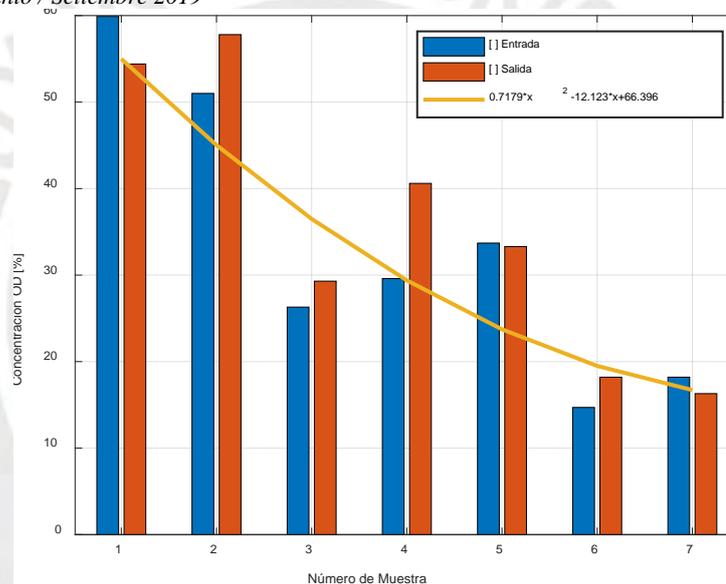
**Tabla 17.**

*Muestras de 1 – 4. Humedal Artificial Chincheros. Resultados entregados por SYNERGIA Ingeniería.*

Fecha:	5-Jun		10-Jun		15-Jun		29-Jun		1-Jul		4-Sep		8-Sep	
Indicador	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S
pH	7.7	7.6	8	8.2	7.6	7.4	7.6	7.7	7.6	7.6	7	7.1	7	7.1
OD	59.9	54.4	51.0	57.8	26.3	29.3	29.6	40.6	33.7	33.3	14.7	18.2	18.2	16.3
TSS	65.5	62.8	69.8	65.5	74.3	73	77.9	76.4	73.2	79.7	111	114	121	108
SAL	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.11	0.11	0.11	0.11

**Figura 53.**

*Gráfico de barras humedal artificial – Demanda de Oxígeno (%) – Resultado de Muestras – Junio / Setiembre 2019*



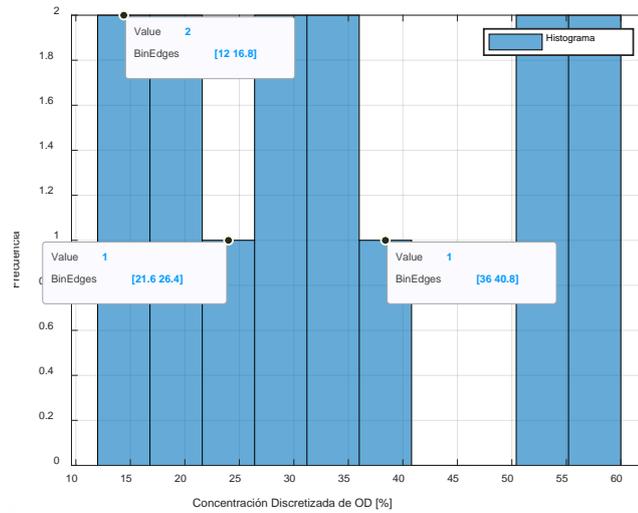
*Nota: La línea amarilla representa el ajuste matemático de tercer grado (línea de tendencia).*

Es interesante observar que existe principalmente:

1. Una tendencia a la baja desde el primer juego de muestras hasta el último.
2. El incremento de concentración de oxígeno en todos los juegos de muestra.

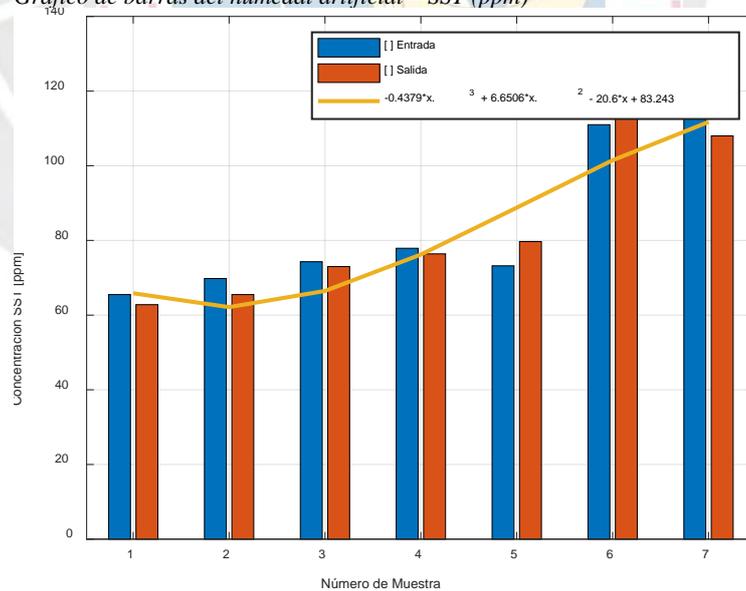
Más adelante, al final del presente capítulo **Resultados** se discute lo presentado. Ahora bien, podemos hacer un histograma para evaluar alguna tendencia estadística si es que existe:

**Figura 54.**  
**Histograma de Datos de OD – Humedal artificial – Chincheros, Cusco 2019**  
 Resultados Muestras - Junio / Setiembre 2019



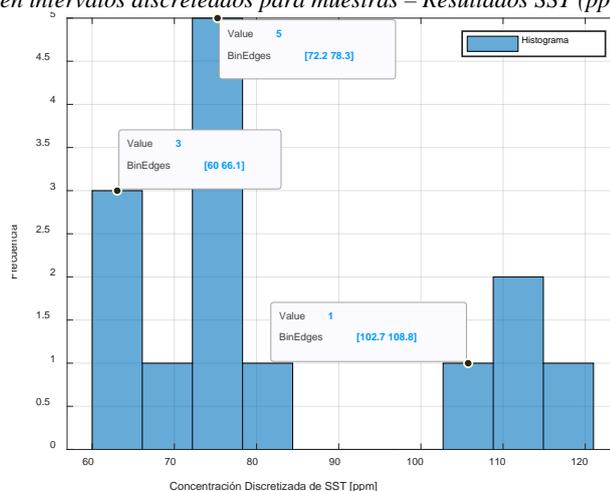
Gracias a la herramienta de MATLAB – función *histogram(A,n)* (*Histogram plot - MATLAB*, s/f) automáticamente se discretiza en función a el valor ‘n’ (el ancho de las barras). Así vemos que la mayor frecuencia se da en las muestras de menor valor (12 % hasta 16.8%). Este gráfico responde a la discusión menor sobre las asunciones que se hicieron al aplicar la prueba estadística en el aplicativo (referirse al capítulo 3 – Seguimiento). Se procede a graficar los resultados para el resto de indicadores que SYNERGIA ingeniería llegó a medir:

**Figura 55.**  
**Gráfico de barras del humedal artificial – SST (ppm)**

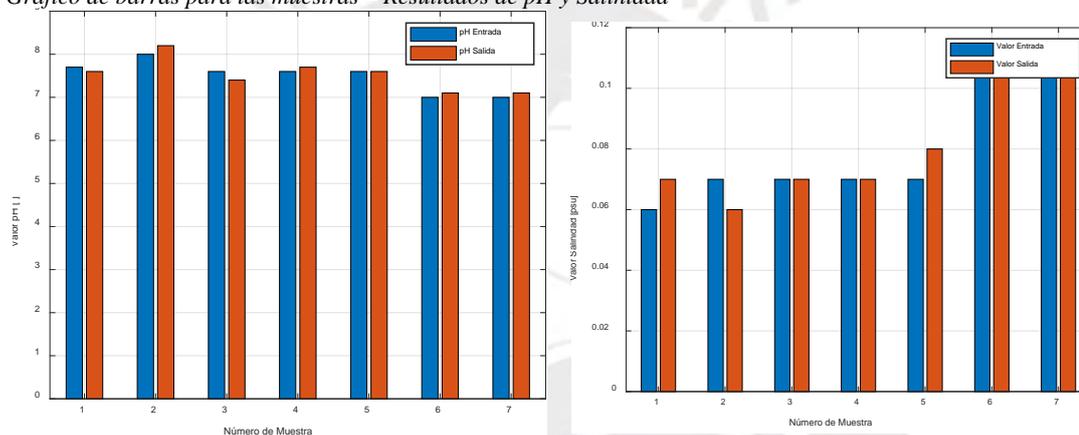


*Nota: La línea amarilla representa el ajuste matemático de tercer grado (línea de tendencia).*

**Figura 56.**  
*Histograma en intervalos discretizados para muestras – Resultados SST (ppm).*



**Figura 57.**  
*Gráfico de barras para las muestras – Resultados de pH y Salinidad*



No se han graficado el resto de indicadores que se obtuvieron debido a que los indicadores escapan aquellos los del interés en relación al aplicativo HumePUCP (específicamente conductividad/resistividad).

### ***Demanda Bioquímica de Oxígeno***

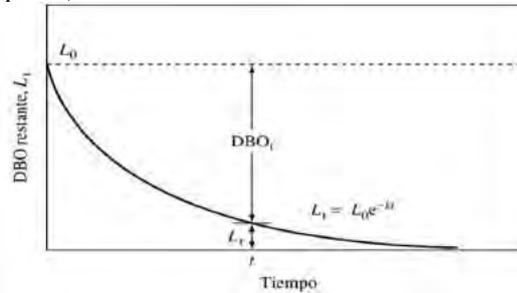
Antes que se proceda a discutir lo encontrado, a continuación, se presentan unos cálculos para convertir las lecturas de OD (oxígeno disuelto) en DBO (demanda bioquímica de oxígeno). Más adelante, estos resultados se incorporan en el aplicativo en la sección obtención de constantes de diseño.

En primer lugar, dado el alcance del proyecto no se ha medido el DBO<sub>5</sub>, es decir, siguiendo el procedimiento riguroso se debió tomar una muestra en el día 1 y luego esperar que la misma muestra se oxide en un intervalo de 5 días y realizar nuevamente la medición de oxígeno disuelto. Aplicando un factor  $p$  de disolución, la resta correspondería a la demanda de oxígeno

de esa muestra. Sin embargo, para este acápite se empleará la medición de DBOC (demanda bioquímica de oxígeno carbonacea) para un tiempo  $t$  de acuerdo al siguiente gráfico.

**Figura 58.**

*Demanda bioquímica de oxígeno en el tiempo (Masters & Ela, 2008, p. 215)*



**Nota\*:** Lo corresponde a la parte carbonácea total a consumirse en el tiempo ( $t = \infty$ ) mientras que  $L_t$  corresponde el oxígeno por consumirse y el  $DBO_t$  corresponde al oxígeno consumido para un tiempo  $t$ .

Luego, de acuerdo a los datos de salinidad que se obtuvieron y el oxígeno disuelto como porcentaje se convierten los mismos en miligramos por litro para una temperatura promedio de  $15^\circ$ . El procedimiento es tal y como se detalla en FONDRIEST (Fondriest, 2013). Ya que la salinidad era prácticamente constante se empleó un valor de 10.084 de acuerdo al cuadro del documento citado. Luego, los datos se tienen:

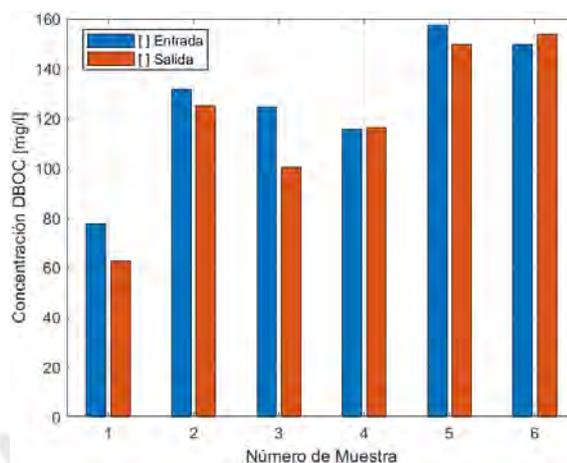
**Tabla 18.**

*Indicadores de calidad de agua (DBO y OD)*

<b>OD</b>	E	59.9	51.0	26.3	29.6	33.7	14.7	18.2
	S	54.4	57.8	29.3	40.6	33.3	18.2	16.3
<b>OD</b>	E	6.3	5.4	2.8	3.1	3.6	1.5	1.9
	S	5.7	6.1	3.1	4.3	3.5	1.9	1.7
<b>DBOC</b>	E	58.1	77.6	131.8	124.6	115.6	157.3	149.6
	S	70.2	62.7	125.3	100.5	116.5	149.6	153.8

Finalmente, se sabe que el valor saturado de oxígeno del agua a  $20^\circ\text{C}$  es de  $9,1 \text{ mg/l}$  y a  $10^\circ\text{C}$  es de  $11,3 \text{ mg/l}$  (Masters & Ela, 2008, p. 211). Interpolando a  $15^\circ\text{C}$  el valor de saturación es de  $10,2 \text{ mg/l}$ . Asimismo, las muestras se realizaron en botellas de  $625 \text{ ml}$  por lo que la fracción de disolución  $p$  será  $30/(30+625)=0,048$ . Luego los valores de DBOC para un tiempo  $t$  del cual se tomó la muestra de OD son como figura en la Tabla 18. A continuación, se grafican dichos resultados:

**Figura 59.**  
 Demanda bioquímica de oxígeno carbonaceo para las muestras del  
 humedal Chincheros, Cusco



#### 4.2.3 Discusión de resultados

En primer lugar, se observa un decrecimiento del caudal (ver Figura 51). Asimismo, de los resultados producto de las muestras se observa en general un decrecimiento en la calidad de agua de ingreso (mayor valor de SST y menores valores de OD, mayores valores de pH, etc). Lo mismo se evidencia para el DBOC. Si bien hay una tendencia al alza (ver Figura 59) en cada muestra de salida la demanda bioquímica de oxígeno carbonáceo es *menor* en el mayor número de muestras. Claramente el humedal tiene una función de oxigenación (OD y DBOC) y limpieza de sólidos suspendidos que se evidencia en cada par de muestras en los gráficos presentados.

Asimismo, de acuerdo a la publicación del MINAM sobre los LMP (MINAM, 2010) para efluentes de vertederos a agua el DBO máximo es de 100 mg/l. Claramente estos valores se incrementan, las causas se analizan a continuación. La tendencia final de los datos es evidente. Incluso, tanto en la Figura 53 y Figura 55 se hizo un ajuste de 3er grado obteniendo una ecuación de tendencia. Estos resultados se entienden desde las condiciones de entrada del humedal. Durante los meses de agosto – setiembre en la región del Cusco y en general la sierra peruana, la cosecha de agua estuvo considerablemente perdiendo sus aguas debido a la significativa escasez de lluvias en la zona. Esto evidentemente permite que el agua se ‘estaque’ desde la cosecha de agua y los remanentes (aguas más contaminadas) fluyan hasta el humedal. De haberse mantenido el mismo flujo de caudal con las mismas condiciones sin duda alguna el humedal hubiera seguido funcionando eficientemente como se evidencia en los primeros muestreos. A continuación, en las Figuras 60 y 61 se muestra una comparativa de las condiciones iniciales y finales de la cosecha de agua. En la siguiente sección se evaluará el

performance del humedal desde la simulación que permite el aplicativo implementado en MATLAB.

**Figura 60.**  
Fotografía cosecha de agua en el mes de marzo 2019.



*Nota: La flecha roja indica la ubicación (no visible) de la rejilla que permite el filtro de dichas aguas hacia la bomba que más adelante dirige sus aguas hacia el humedal.*

**Figura 61.**  
Cosecha de agua con aguas mínimas durante los meses de agosto - setiembre



#### 4.3 SEGUIMIENTO AL HUMEDAL ARTIFICIAL CON HUMEPUCP - OBTENCIÓN DE CONSTANTES DE DISEÑO (CASO DEL APLICATIVO)

Una vez realizado el seguimiento y graficando los resultados, se procede al análisis paramétrico. Se evalúan aquellas curvas de salida que se obtuvieron  $C_e$  (Concentración *exit*/salida) y las que el modelo hubiera arrojado  $C_m$  (Concentración **M**odelo).

##### 4.3.1 Sólidos Suspendidos Totales

Nótese en particular los resultados directos que se incorporan en el aplicativo. En particular  $K_t$  difiere de  $K_{20}$  por lo que se debe realizar un cálculo previo para ingresar el valor. Igualmente, para el caudal se toma el caudal promedio tomando de la lectura de datos de seguimiento. Ahora para TRH o CHS se justifican dichos cálculos. Luego, se hace click en el botón generar y se obtiene:

$$K_T = K_{20} \theta^{T_w - 20}$$

$$K_T = 1000 \frac{m}{año} * 1.064^{13-20}$$

$$K_t = 647.75 \frac{m}{año}$$

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

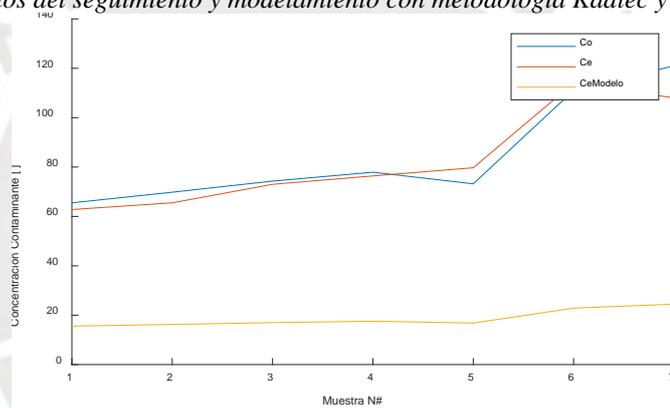
$$CHS = \frac{2.5 \frac{m^3}{d}}{14.0 m^2}$$

$$CHS = 0.178 \frac{m}{d} = 65.17 \frac{m}{año}$$

**Figura 62.**  
Condiciones iniciales ingresadas

Parámetros Determinísticos	Resultados
KADLEC	Qin (m3/d) 6
EPA2000	As (m2) 14
REED2006	K_t 647.8
WEF	TRH o CHS (d o m/año) 65.17
	y 0.55
	theta 1.064

**Figura 63.**  
Resultados del seguimiento y modelamiento con metodología Kadlec y Knight



**Figura 64.**  
Resultados – Diseño para SST

Resumen [C] Salida / Modelo	
Media	82.7
Media	18.6
Desv. Est.	18.7
Desv. Est.	3.25
Eficiencia η	2.24%

### 4.3.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

El tiempo de retención hidráulico difiere al del modelo de Kadlec en unidades solamente. Asimismo, se debe realizar el cálculo de Kt en función al K20 sugerido por el autor. En este caso, se empleó el valor de 0.678 a una temperatura de de 13°C.

$$TRH = \frac{Q}{A} = 0.48 \approx 0.5 \text{ d}$$

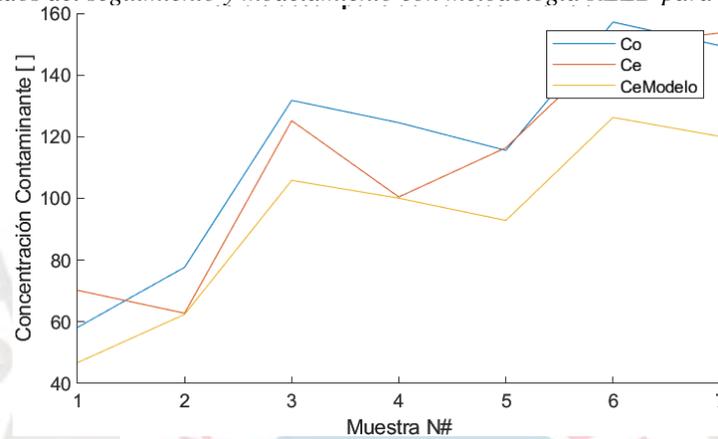
$$K_T = 0.678 \frac{m}{año} * 1.064^{13-20}$$

$$K_t = 0.439 \frac{m}{año}$$

**Figura 65.**  
Resultados – Diseño para DBOC

Parámetros Determinísticos		Resultados			
KADLEC	EPA2000	Qin (m3/d)	6	As (m2)	14
REED2006	WEF	TRH o CHS (d o m/año)	0.5	K <sub>t</sub>	0.439
				y	0.55
				theta	1.064

**Figura 66.**  
Resultados del seguimiento y modelamiento con metodología REED para el DBO



### 4.3.3 Discusión de Resultados

**De los sólidos suspendidos totales SST:** En la Figura 63 se observa una proyección sobre los contaminantes. Este proyecta que el modelo está muy por debajo de lo que realmente se obtuvo (Ce). Haciendo el cálculo con los resultados de la

Figura 64 se obtuvo una diferencia de hasta  $82.7/18.65=4.43$  veces, lo que es más el indicador de eficiencia muestra un valor muy pequeño de solo el 2.24%. Esto naturalmente alza la atención ya que idealmente se hubiera esperado que la proyección de eficiencia sea sustancialmente buena. Sin embargo, esta proyección se entenderá desde las fórmulas empleadas y lo que es más, se resalta la importancia de la presente tesis, tanto por el lado computacional y la aplicación en campo.

Por un lado, la **influencia del factor  $K_{20}$**  es evidente en este inciso ya que según la literatura este debe de ser 1000 m/año. De igual forma, esta constante se empleó para el diseño inicial. Idealmente, como se emplearon estos valores en el diseño, la expectativa de limpieza debería ser con una eficiencia del 100%. Sin embargo, estos valores referenciales tan arbitrarios arrojan resultados como los observados. Una convergencia muy distante entre lo real y lo modelado.

Siguiendo las líneas del estudio de la presente tesis: *análisis de sensibilidad*, se explora un poco más la influencia de estos parámetros. Esta discusión termina con la implementación de la simulación con Montecarlo para afinar estos parámetros aún más.

La concentración de salida según Kadlec y Knight están definidas por:

$$C_e = C^* + (C_o - C^*)e^{-\frac{K_t}{CHS}} \quad (20)$$

Por un lado,  $C^*$  que hace a un umbral el cuál el humedal no puede limpiar. Es decir, la carga suspendida que se acumula en el tiempo en el humedal:

$$C^* = 5.1 + 0.16 * C_o \quad (21)$$

Un primer sesgo ya se evidencia, por ejemplo, que ningún humedal diseñado bajo este criterio mostrará una concentración menor a 5.1 mg/l, por ejemplo.

Siguiendo con el análisis nótese la influencia del exponencial  $e^{(-K_t/CHS)}$ . En la medida en que el exponente sea mucho más que la unidad, la influencia del exponencial será mínima/efímera. Para las condiciones bajo las cuáles se diseñó se tiene un exponente de  $-647.75/65.17=9.93$ . ¡Es hasta 9 veces superior! Esto implica que prácticamente la concentración de salida dependa únicamente de  $C^*$ :

$$C_e \approx C^* + (C_o - C^*) \left[ e^{-\frac{K_t}{CHS}} \rightarrow 0 \right] \approx C^* \quad (22)$$

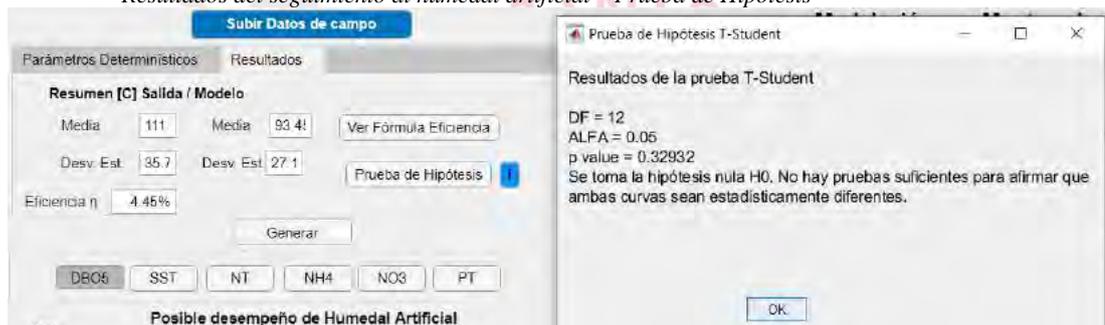
Así, evaluando esta diferencia se remonta principalmente al cálculo de  $K_t$ ; ya que  $CHS$  depende de las condiciones del humedal (Caudal / Área). Para calcular  $K_t$  se empleó un valor de  $K_{20}$ , es decir 1000.0 m/año. Este valor, corresponde al uso de los valores referenciales sugeridos por los autores, en este caso Kadlec y Knight ((Rabat & Trapote, 2016, p. 90) y (Pidre Bocado, 2010, p. 114). Tomando en cuenta dicha experiencia, para evitar dicha convergencia de resultados y en el peor de los escenarios descartar a los humedales como una opción viable para la limpieza de aguas residuales/contaminadas, es importante resaltar el uso de constantes provenientes del ajuste estadístico o experiencias en provenientes de otros países.

En un segundo plano, se toma en cuenta la divergencia con la cuál se cuenta tanto para realizar un diseño o ejecutar un mantenimiento. En primer lugar, se tomó como concentración inicial de referencia una concentración de  $C_o=288.8$  mg/l. Este resultado proviene del primer ensayo de laboratorio realizado por FAMILAB en Cusco. Más adelante, SYNERGIA arrojó valores de entrada de  $C_o$  que oscilan en los 60 ~ 120 mg/l (ver Figura 55). Así, esta divergencia se explica desde el mismo análisis de vida de las aguas entrantes que se discutió en el acápite de Resultados de Implementación en campo. La calidad de agua desde la cosecha estuvo variando en el tiempo. Lo que es más, para el particular análisis de **SST** influye mucho el estado del

agua (si hubieron lluvias previo a la toma de muestras), si la toma de muestra se hizo de forma significativa; si hay fauna que pueda haber sesgado la muestra, etc. En la práctica en ingeniería es usual que exista esta influencia de variables por lo que será importante para los ejecutores de dichas obras como lo son humedales tomar en cuenta dicha complejidad.

**De la demanda bioquímica de oxígeno carbonacea  $t$ :** De acuerdo a la revisión bibliográfica, el método de Reed para el diseño en función al DBO es el más empleado. En este caso, los resultados se reafirman dado que de acuerdo a los cálculos el aumento de oxígeno circundante en las agua no debería ser mayor. Nótese así en la Figura 66 que las curvas están prácticamente superpuestas, es decir, el modelo no preveía que con las condiciones iniciales se vaya a incrementar sustancialmente el oxígeno circundante. Finalmente, se realiza la prueba de hipótesis para verificar cuán distribuidos están estos datos, si la curva del modelo y lo que resultó son muy dispares o no hay prueba suficiente para afirmar que son iguales.

**Figura 67.**  
*Resultados del seguimiento al humedal artificial – Prueba de Hipótesis*



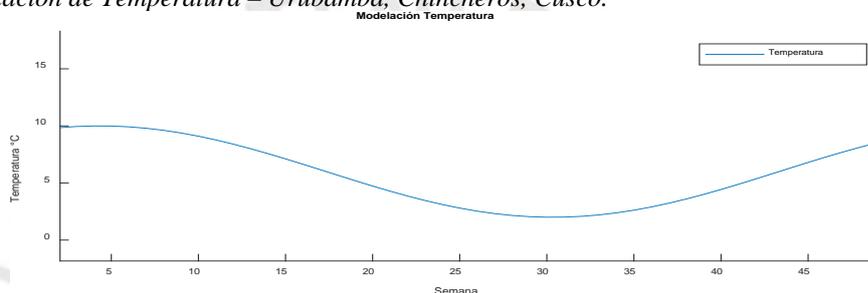
Se observa así que tenemos un valor de  $p > 0.05$  indicando que “Se toma la hipótesis nula  $H_0$ ”. Es decir, ambas curvas con un valor de corte de 0.05 (alfa) no son muy distintas. Se observa además que el promedio de salida del modelo es de 93.5 mg/l aproximadamente. Este no es un gran valor de DBO ya que se consume sustancialmente el oxígeno disuelto. Idealmente, no solo las curvas deberían ser parecidas sino se encuentran muy por debajo de los valores de ingreso. Aun así, la prueba de HumePUCP cumple eficientemente su trabajo ya que finalmente se infiere que las constantes de diseño empleadas son relativamente buenas ya que pronostican bien los resultados de salida; el caso no fue el mismo para el modelo de SST. Ahora, haciendo uso de HumePUCP se tratará de cerrar dicha brecha sugiriendo nuevos valores de  $K_{20}$  y  $\Theta$  por ejemplo, que se aproximen mejor a la realidad. A continuación, se tratará de corregir esta disparidad con la última herramienta que contiene el aplicativo para el SST: el análisis estocástico.

#### 4.3.4 Análisis con el método de Montecarlo

Empezamos modelando la temperatura. Si el usuario no se percatara de este paso igualmente el aplicativo muestra un mensaje indicando que se debe iniciar por este paso con los comandos *try-catch error* en MATLAB. Luego, para este caso en particular se sabe que la zona presenta máximos de hasta 18°C y mínimos de 2°C para el mes Junio (percentiles superior e inferior – ver metodología de trabajo). En promedio, lo máximos se dan para el mes de Diciembre/Enero (MesMax=1) de  $(18+8)/2=13^\circ$  y mínimos promedio de  $(18+2)/2=10^\circ\text{C}$ . Luego, la temperatura modelada vendrá a ser:

**Figura 68.**

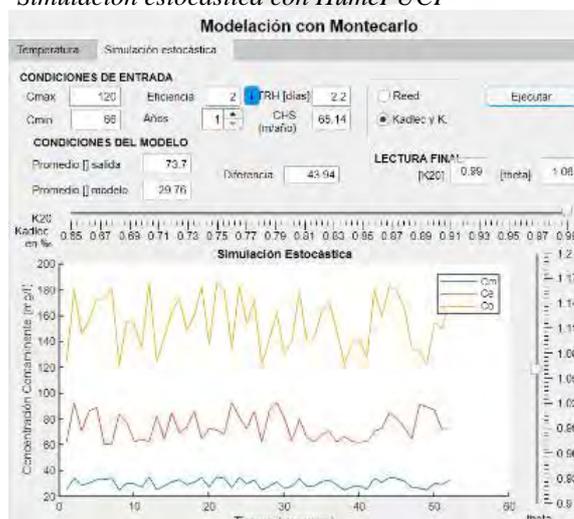
*Modelación de Temperatura – Urubamba, Chincheros, Cusco.*



Luego, se indican las **condiciones de entrada** en el aplicativo (ver Figura 69). De la recolección de datos con SST el valor máximo esperado fue de 120 ppm y mínimo de 66 ppm. Luego la eficiencia en este punto se refiere la proporción de Co/Ce. Esta proporción indica cuán riguroso es el trabajo o bien este se hará dependiendo de la experiencia y habilidad del ejeturo (involucra variables como facilidad de crecimiento de plantas, flujo constante, oxigenación y simetría en el trabajo, etc). Para este trabajo la eficiencia se califica en 2, por ejemplo. Este valor se irá iterando conforme se tenga mayor data. Finalmente, de los cálculos anteriores CHS es 65.14 /m/año. Así se tiene:

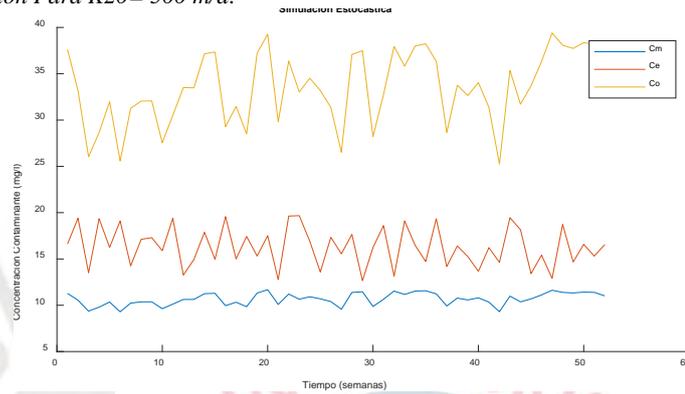
**Figura 69.**

*Simulación estocástica con HumePUCP*

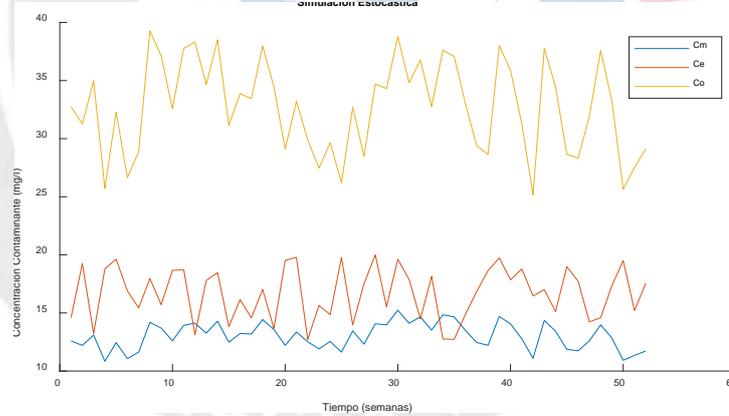


$K_{20}$  se indica que está en ‰. Así, el valor de 0.99 corresponde aproximadamente a 1000 m/d exclusivamente para el modelo de Kadlec y Knight. El resultado, como es de esperarse, el mismo que se ha observado en el humedal con los valores reales (ver Figura 63). Según el **modelo** la remoción de SST debería de ser muy buena, por ende, la línea azul  $C_m$  se muestra en la parte inferior. Ahora bien, se interactúa con  $K_{20}$  y  $\Theta$  a fin encontrar una más aproximación real.

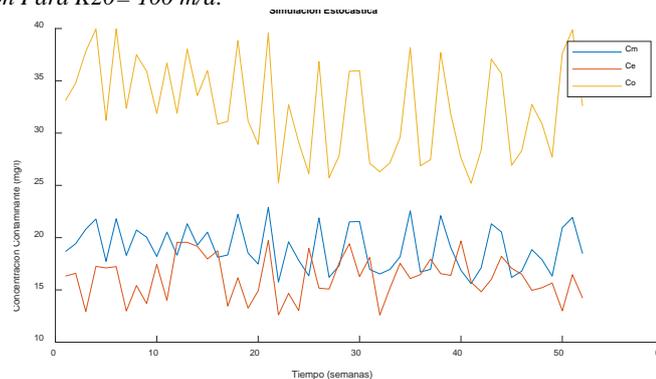
**Figura 70.**  
Simulación Para  $K_{20}= 500$  m/d:



**Figura 71.**  
Simulación Para  $K_{20}= 200$  m/d:

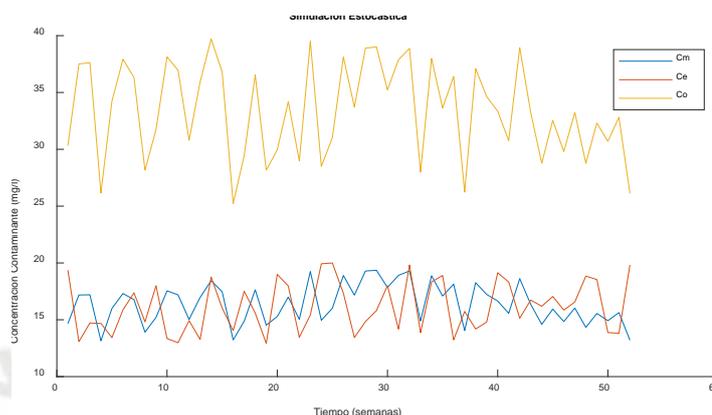


**Figura 72.**  
Simulación Para  $K_{20}= 100$  m/d:



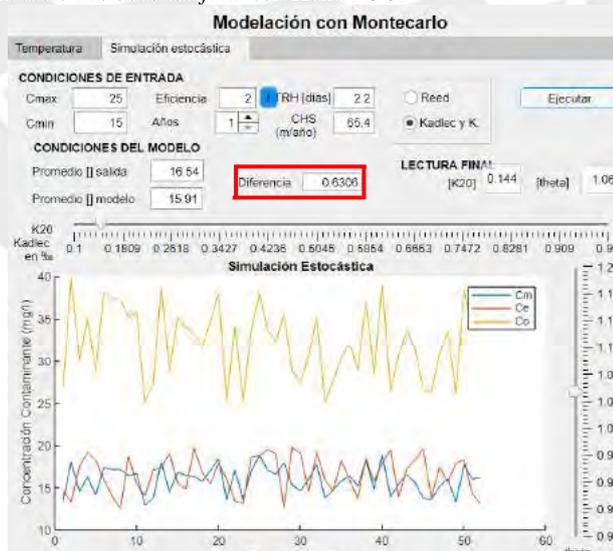
Se observa la tendencia de  $C_m$  ir subiendo en medida que  $K_{20}$  sea menor. Para  $K_{20}=100$  m/d la diferencia en medias es de -2.8 aproximadamente; la diferencia ya es negativa. Iterando una vez más, con un valor más conservador:

**Figura 73.**  
Simulación Para  $K_{20}= 150$  m/d:



La diferencia en medias es de -0.7 para una primera ejecución, para una segunda fue de -0.169; 0.44; 0.63, etc. Así, aproximadamente en una primera inspección  $K_{20}=150$  m/d es un mejor valor de diseño para el humedal.

**Figura 74.**  
Simulación estocástica final con HumePUCP



Sin duda alguna, estos valores son motivo de análisis por la naturaleza de esta simulación (aleatoria). A continuación, se discuten los puntos más importantes.

#### 4.3.5 Discusión de Resultados – Implementación Montecarlo

El valor de  $K_{20}$  se comentó anteriormente que oscila en un valor de hasta 1000 m/año (Pidre Bocardo, 2010, p. 114). Asimismo, dentro de la literatura, la discusión puede llegar a ser más amplia. Por ejemplo, autores como Reed W. Cites desarrollan otros enfoques para el contaminante tratado acá sobre SST. Según Reed W. Cites la remoción de SST no depende de la temperatura por lo que no se convierte en un factor limitante de diseño (Reed et al 2006, p. 310) contrario a lo trabajado y citado en el trabajo de Kadlec y Knight. Como se observa en esta divergencia de resultados y criterios, la opción más viable sería tener una base de datos local (o en este caso una experiencia similar) y en función a ello indagar los valores más acertados. Como se ha visto, para la presente tesis dentro del modelo denominado 'Kadlec y Knight' en la remoción de sólidos suspendidos totales (SST) el valor de  $K_{20}$  es de **150.0 m/año** aproximadamente mientras que el valor de  $\Theta$  dadas las simulaciones no tiene mayor influencia ya que depende netamente del exponente T (temperatura) y para nuestro modelo en particular este oscila de 10 a 13°C por lo que no es significativo (por lo que  $\Theta$  se mantuvo en un valor de 1.064 [ ]). Lo contrario ocurre, por ejemplo, con modelos como Reed para DBO<sub>5</sub> donde el valor inicial de  $K_{20}$  empieza oscila entre valores de 0.4 a 0.6. Luego, el producto de  $\Theta$  y K tiene mayor influencia en el resultado final  $C_e$  (concentración de salida).

Respecto a la aplicación en campo, sin duda alguna existen puntos a mejorar tales como el tiempo total y/o vida del humedal en Chincheros (proyección de funcionamiento), la logística para el muestreo y el seguimiento y mantenimiento del sistema, etc. Por un lado, el presente trabajo en campo fue relativamente pequeño frente a los sistemas masivos de depuración a través de humedales que se emplean en otras regiones del mundo. Esto se correlaciona con los alcances proyectados para una tesis de pre grado. También, el muestreo para el presente trabajo se dificultó debido al aspecto logístico. Debido que las muestras debían ser recolectadas por terceros en Chincheros, para ser llevadas a la ciudad del Cusco para su embalaje y luego ser enviadas a la ciudad de Lima, nuevamente almacenadas y finalmente trasladadas hasta el laboratorio para la ejecución de la medición. Soluciones más prácticas como mediciones *in situ* ofrecen confiabilidad aumentada para esta situación.

Por otra parte, respecto al trabajo en gabinete, la simulación estocástica llevada a cabo fue empleados valores sintéticos (aleatorios) en función al muestreo realizado. Sin embargo, una aproximación mucho más rigurosa vendría, por ejemplo, de implementar los valores reales de entrada  $C_0$  y usar los modelos estocásticos en función a estos datos. Por ejemplo, de hacer un seguimiento de un año con muestras mensuales de SST/DBO obteniendo un par de muestras cada semana haciendo un total de 104 muestras (52x2), permitiría modelar e indicar estas

constantes de diseño con mayor precisión. De estadística sabemos que a mayor número de muestras ( $n > 30$ ) podemos observar mejor la tendencia que siguen los datos. Lo que es más, el modelo en **HumePUCP** permite simular hasta N años la proyección. Asimismo la herramienta SIMULINK no fue explorada a profundidad con el potencial que este ofrece. Por ejemplo, existe la posibilidad de conectar sensores al programa mismo y recoger en tiempo real data. Así, esto permitirá agilizar la lectura en campo y permitiría tener una base de datos más diversa y precisa.

Otra de las inquietudes que deja abierto el presente trabajo es el aspecto altruista u *open source*. El aplicativo es de libre acceso a través de *File Exchange* en MathWorks, empresa que desarrolla MATLAB en los Estados Unidos. La intención fue permitir que más usuarios construyan en función a este primer trabajo más potencialidades dentro del aplicativo. De ahí que se adjunta no solo el código empleado sino también sugerencias y consideraciones técnicas en cuanto a la programación. Esto promoviendo que más usuarios hagan uso del mismo y exploten las herramientas que a su vez se van actualizando y mejorando dentro de MATLAB.

Dentro del marco de cooperación, también implica compartir las constantes de diseño y permitir la generación de una base de datos así para que futuros proyectos tengan una base sólida de referencia y emprender nuestros proyectos de humedales con mucha mayor confiabilidad en cuanto a la remoción de contaminante se trata. Un primer intento de estandarización viene de la generación de la ficha técnica con **HumePUCP** que fácilmente puede ser compartida.

Finalmente, terminando la presente discusión de lo hallado, la herramienta y la experiencia sin duda alguna dan un primer paso seguro sobre el modelamiento de sistemas aleatorios y abren la ventana para un sinnúmero de optimizaciones; como se suele emplear en inglés, existe un *'room for improvement'*. Los aspectos mencionados demuestran el potencial al cuál cada vez nos acercamos como investigadores y académicos interesados en el tema sobre el medio ambiente.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente capítulo de conclusiones se divide en tres aspectos. En el primer aspecto se comenta la hipótesis propuesta al inicio de esta investigación **¿Cuánta eficiencia y facilidad de diseño adquiere el modelamiento de un humedal artificial de flujo superficial con el software MATLAB?** El segundo aspecto recoge los conocimientos, retos y lecciones adquiridas tras la implementación en campo de un humedal artificial. Por último, el tercer aspecto recoge ideas importantes sobre las herramientas empleadas (**tecnología**) y el potencial del uso de este tipo de aplicativos. Finalmente, este último capítulo se concluye con una apreciación personal.

### 5.1 DE LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN E HIPÓTESIS DEL TRABAJO

Tras una primera inspección, resulta intuitivo afirmar que la incorporación de un proceso de diseño en ingeniería asistido por un computador siempre será más eficiente. Sin embargo, en la pregunta de investigación se plantea cuantificar este beneficio. Este campo de valorización es difuso pues solo los usuarios quienes saquen un beneficio de emplear un software podrán valorarla incluso de forma subjetiva. Sin embargo, a grandes rasgos a lo largo del presente trabajo, se pueden identificar las siguientes ideas respecto al beneficio adquirido:

#### 5.1.1 Recopilación de la información

La literatura en cuanto a construcción de humedales artificiales puede llegar a ser extensa, rescatando de esta, autores en particular cuyos trabajos representan hitos en esta disciplina (Reed et al, Kadlec y Knight, US EPA 2000, etc). En el presente trabajo, al haber hecho una recopilación de ciertas metodologías un nuevo proyectista no debería atravesar nuevamente por el proceso de reunir esta información. Esto en el tiempo tiene una aplicación tremenda ya que de diversificarse el uso de este sencillo aplicativo resultaría en un mayor número de humedales implementados. El aplicativo muestra un resumen donde se recogen tanto las ecuaciones por autor y por contaminante y, por otro lado, las constantes de diseño empleadas por cada autor. Estos se encuentran dentro del aplicativo en la pestaña 'Diseño' en los botones: ecuaciones empleadas y constantes de diseño.

Asimismo, teniendo la facilidad de acceso a la información el usuario tiene la posibilidad no solo de indagar respecto a la metodología sugerida por cada autor, sino hacer una comparativa sobre cada sugerencia. Por ejemplo, para el caso de la metodología de Reed, usualmente el área de diseño que arroja suele ser menor que el resto de metodologías; al menos sustancialmente menor que el modelo sugerido por el EPA2000. Por otra parte, lo contrario

ocurre para diseñar en función al fósforo (PT); ya que según la metodología sugerida por Reed se requiere mayor área superficial si en comparativa uno estaría diseñando con la metodología del autor Kadlec. Cabe resaltar que, en particular para el trabajo en Chinchero, de debió empezar desde cero la recopilación de información y metodologías existentes. Sin embargo, una vez establecido el aplicativo, y hecha su publicación en la base de datos de MATLAB cualquier usuario debería ser capaz, así como lo son los aplicativos de celular ahora, descargar el trabajo e implementarlo como el usuario vea por conveniente.

### **5.1.2 Sobre un diseño eficiente**

Tras una primera inspección del proyecto en campo realizado en este trabajo, el lector no se verá interesado en buscar optimizar un área relativamente pequeña (14.0 m<sup>2</sup> al final de este proyecto). Sin embargo, en proyecto sirvió como piloto para implementar de forma más adecuada el aplicativo. Aun así, para otros proyectos en ingeniería de mayor envergadura, cuando las cantidades de caudal resultan importantes, o la demanda por la calidad final del agua aumenta, es posible reducir una cantidad significativa de área superficial. Como se resalta en el presente texto, esto se traduce en menores costos de construcción y mayor eficiencia en cuanto a remoción de contaminantes se trata.

Siguiendo otros ejemplos, como lo es en Estados Unidos donde se observa un uso agresivo de esta tecnología cuyos campos de aplicación se extienden hasta extensiones en magnitud de hectáreas, la presente tecnología resulta de bastante interés. En nuestro país, dada la revisión bibliográfica, probablemente el humedal de la UNI es uno de los proyectos más grandes que se han desarrollado hasta la fecha. Dada la continua investigación en esta rama, no resulta sorprendente que cada vez se emprendan proyectos de mayor auge. Así, se reafirma nuevamente la importancia de automatizar estos procesos con herramientas como lo son el paquete de desarrollo de aplicativos en MATLAB.

### **5.1.3 Sobre el modelo estocástico y prueba de hipótesis incorporada**

La cuidadosa prueba de hipótesis incluida en el aplicativo permite al usuario indagar aún más sobre la efectividad del sistema que está trabajando. Esto, de la mano de una primera aproximación a un modelo estocástico, sin duda alguna permite al usuario optimizar aún más su trabajo. Respecto a los resultados de la optimización en función a los SST (empleando el método estocástico) si bien con una constante afinada se tiene una mejor proyección del modelo, este no deja de ser ineficiente debido a su bajo éxito de remoción de SST del humedal en sí. Sin duda alguna esto lleva a remontarse nuevamente al diseño, tratando de incorporar estas nuevas consideraciones al momento de diseñar el humedal. De esta forma, una

retroalimentación de estos sistemas eventualmente llevará a una mejor comprensión de estos y finalmente una mejor confiabilidad de los resultados finales.

Siguiendo los resultados de la investigación, resulta interesante ampliar la discusión en este punto respecto al modelo planteado en este trabajo y analizar hasta dónde estas constantes de diseño pueden optimizarse (exactamente en la etapa de seguimiento sobre la hipótesis estadística y las ecuaciones para el análisis estocástico desarrolladas). Luego, resulta provocativo cuestionar *aún más allá hasta donde las metodologías por autor son válidas*. De acuerdo a la literatura más reciente, se tienen distintos enfoques para abordar el ya conocido problema de la incertidumbre y variación aleatoria del *input* y *output* de estos sistemas. Ya de por sí, tratar de ‘predecir’ el clima es una tarea compleja. Sin embargo, los esfuerzos que hoy a cabo se llevan con la tecnología disponible cada día nos acercan más a una mejor comprensión del problema. En particular, nuevos autores como Aragonés, D. proponen modelos biocinéticos para justamente humedales artificiales de flujo superficial. Dicho modelo se centra en intervenir procesos físicos y bioquímicos involucrados en la remoción de contaminantes capturando la sinergia de los principales actores que actúan sobre la remoción (bacterias, macrofitos y fitoplácton) (Aragonés et al., 2020). En perspectiva, el presente trabajo asume dicha sinergia de agentes como una constante; el valor de descomposición cinética de primer orden  $K_{20}$ . Sin duda alguna, en un medio continuo donde pecar por ‘objetivizar’ los elementos de estudio cada vez pierde valor. El investigador se da cuenta de la influencia profunda que tienen los distintos agentes de forma directa e indirecta en cualquier proceso.. Así, modelos como **SURFWET** por Aragonés et al. (2020), aproximan estos diseños cada vez más a una modelación más real. Así, como es característico de su naturaleza, para dicho desarrollo del ya mencionado estudio se incorporan derivadas parciales justamente para evaluar este cambio en un contexto de conservación de la masa. Sin embargo, en la práctica estos modelos aún requieren de una mayor simplificación para que puedan ser empleados masivamente. En este punto, **HumePUCP** presenta una mayor ventaja al sembrar fundamentos en los modelos ya existentes y validados de la literatura.

Sin embargo, en el marco de aporte a través de las conclusiones, es válido mencionar que a la más allá de aplicaciones directas como **HumePUCP**, existen modelos que sí incorporan cierta complejidad, pero a la vez no pierden de vista esa practicidad necesaria para su implementación. Dicho caso es el de optimización numérica aplicada en el estudio “Modelos matemáticos integrados para reservorios de agua potable y humedales artificiales [...]” por Sinisclachi A., et al. (2020). En dicho estudio, dejando de lado la modelación específica de bacterias y sinergia dentro del humedal, considera optimizar el área superficial a través de la minimización de una integral de la diferencia cuadrática de la concentración total de nitrógeno

y los deseados valores de límite para eutrofización (Siniscalchi et al., 2020). El esfuerzo producto de dicha investigación arroja propuestas como la construcción de dos humedales teóricos posteriores al caso de estudio que es el reservorio Paso de las Piedras en Argentina, logrando optimizar no solo el área requerida para la implementación de estos sistemas sino proyectado una significativa disminución de contaminante (nitrógeno) y control de la eutrofización. Finalmente, la consideración de los estudios mencionados y a la par con HumePUCP abre la puerta a un sin número de aplicaciones en el campo de los humedales y optimización numérica. No sería sorprendente más adelante encontrar estos modelos tan complejos y modernos de optimización dentro de aplicativos reales y de uso comercial. En suma, todo como fin último la conservación del agua y alternativas funcionales frente a la crisis climática. Así, habiendo resaltado a grandes rasgos los beneficios que otorga la optimización a través de un aplicativo para sistemas de depuración de aguas servidas como lo son los humedales y sus limitantes, como tesista considero que tanto la hipótesis de investigación se valida de forma exitosa al encontrar varios y valiosos aportes; y la pregunta de investigación no solo se reafirma sino abre la puerta a un sinfín más de aplicaciones como se fue comentando la presente sección.

## **5.2 SOBRE LA IMPLEMENTACIÓN EN CAMPO**

Las conclusiones en este aspecto netamente ingenieril se pueden desprender desde cada etapa del proyecto. El diseño se logró una vez que se hizo la recopilación de información, metodologías y lectura de manuales de construcción. Sin embargo, los retos se plasmaron principalmente en la gestión del agua y los bajos recursos económicos. Se tuvo que diseñar un sistema tanto en la entrada y salida del humedal para medir el caudal de ingreso. Por ello, se infiere que los cursos en la facultad de Ciencias e Ingeniería en cuanto a gestión de recursos hídricos son de suma importancia ya que de lo contrario se hubiera tenido vacíos conceptuales para llevar a cabo dichas implementaciones.

Asimismo, otro de los grandes retos fue la gestión de los recursos y mano de obra. En el diseño, fácilmente se podía visualizar el trabajo terminado. Sin embargo, en la práctica se debía prevenir con bastante detalle el traslado de las plantas al sistema. En particular, la totora/junco se encontraba en zonas aledañas a la ubicación del proyecto. Sin embargo, el acceso a estas zonas no era sencilla ya que por más que se contó con vehículos de transporte, el trasplante de más de 50 ejemplares no era tarea sencilla.

Seguidamente, el resto de observaciones nacen desde la etapa de mantenimiento del proyecto. Es necesario contar un técnico que se encargue de darle mantenimiento periódico al sistema.

Por un lado, el agua de entrada cuenta con sólidos suspendidos. Estos con el tiempo bloquean la salida del agua en la tubería de ingreso dado que su diámetro es pequeño. Dada esta situación se bloquea el flujo de ingreso distribuido uniformemente a lo largo de la sección transversal del humedal. Es necesario por ello limpiar estos sistemas. De igual forma, el caudal de ingreso puede variar dependiendo de las condiciones en las cuales se construyó por lo que una verificación periódica ayudaría al funcionamiento del sistema. Asimismo, en el periodo de “incubación” o “adaptación” de las plantas (después del traslado) se pueden formar algas en la superficie. Como se aprendió de la revisión teórica, la formación de algas en la superficie bloquea el ingreso de rayos solares a la raíz de las plantas, bloqueando la función natural de las totoras o juncos en cuanto a remoción de contaminante se refiere. Es por ello que es importante, al menos en los primeros días de funcionamiento, que el humedal se encuentre en constante limpieza. Finalmente, se rescata la función última del proyecto. Hasta la fecha se han hecho mediciones en campo en Chincheros que demuestran efectivamente la contaminación inicial disminuye respecto a las mediciones hechas aguas arriba.

### 5.3 SOBRE EL APLICATIVO

**MATLAB** tiene una importante característica denominada *File Exchange*. En esta, diversos usuarios alrededor del mundo pueden subir sus proyectos y compartir en línea sus hallazgos. En particular esta herramienta ha sido de gran utilidad ya que al analizar el código de diversas funciones en otros aplicativos se han podido implementar en este.

Asimismo, *File Exchange* actúa como una suerte de “tienda” al igual que los aplicativos para celular donde se conoce la popularidad y cantidad de descargas para cierto paquete. En este contexto es que se sube el trabajo realizado aquí. De esa forma cualquier usuario con acceso a internet pueda emplear la herramienta trabajada. Basta con contar con **MATLAB**. Luego cualquier usuario puede ingresar en el código fuente del aplicativo y modificarlo a su gusto. Basta con escribir un código limpio donde las instrucciones a cada función estén expresadas claramente así cualquier nuevo usuario puede seguir las instrucciones y comprender fácilmente el funcionamiento. Esta capacidad de generar nuevas herramientas y compartirlas con la capacidad de mejorarlas prueba ser una iniciación interesante no solo para el diseño y desarrollo de humedales sino para muchos otros proyectos en ingeniería. Se sabe, de los casos más exitosos de esta documentación, que sistemas mucho más complejos como motores mecánicos, control automatizado de drones, brazos robóticos, etc., son trabajados con estas herramientas.

Seguidamente, la ficha técnica generada entra en el contexto de **MATLAB online**. Con esta herramienta se pueden compartir archivos dentro de un aplicativo con usuarios que dispongan

acceso a la red. De esta forma, en tiempo real, se puede ir conociendo toda la documentación que se está generando en el aplicativo. De esta forma se genera una base de datos acerca de todos los proyectos que se están llevando a cabo no solo en Perú sino alrededor del mundo. Inicialmente, las tasas de descomposición  $K_{20}$  y  $\theta$  están asociados a distintas plantas. Pero como se discute a lo largo de la tesis, no hay ciencia cierta para creer que dichas constantes son innatas de cada plata y/o sistema. Existe una gran variación dada la infinidad de variables que actúan sobre el sistema. Tras ello, al construirse una base de datos extensa se pueden, en primer lugar, hacer correlaciones de los factores de diseño. Seguidamente, tras un análisis exhaustivo se pueden desprender conclusiones causales respecto a estas correlaciones. Dado esto se va generando mejor comprensión acerca de estos sistemas mientras miles de personas se van sirviendo del producto final.

Finalmente, cabe resaltar una de las limitaciones con las que cuenta MATLAB es la el uso de la licencia. Si bien, hoy por hoy bastantes centros educativos apuestan por la adquisición de una licencia académica como en la PUCP, si se deseara masificar el uso de estos aplicativos resulta limitante en ese aspecto. En ese sentido, existen en el mercado diversas herramientas de acceso libre como lo son R o Python que de igual forma ofrecen funcionalidades para optimizar y realizar un complejo cálculo computacional. Si bien esta puede ser una limitante, el mundo de la computación constantemente busca soluciones rápidas y baratas. Así, cabe mencionar que MATALB cuenta con una compilación de código para cambiar a C++ o C#. Así, en un futuro los aplicativos desarrollados fácilmente se podrían adaptar a otras plataformas de así requerirlo.

### **5.3.1 Sobre el uso de AppDesigner y SIMULINK**

La herramienta SIMULINK es empleada por sistemas electrónicos cuyos niveles de abstracción son altos, por lo que plasmar visualmente dichos procesos resulta altamente beneficioso. En este contexto, el aplicativo desarrollado aquí uso SIMULINK como una herramienta alterna para generar código. Es decir, en vez de que el usuario tenga que revisar el código fuente evaluando línea a línea las fórmulas empleadas, simplemente se dirige a SIMULINK y de forma visual evalúa principalmente el álgebra empleado. Aunque en primera instancia este puede parecer no muy beneficioso, el interés se genera comprendiendo a fondo las bondades de SIMULINK. Una de las principales cualidades es la capacidad de registrar datos. Dada las limitaciones del presente trabajo no se ha incursionado en este campo, pero idealmente se espera que futuro si se llegara a realizar. Por ejemplo, los celulares móviles tienen una infinidad de sensores trabajando constantemente. Fácilmente los datos registrados por estos sensores pueden conectarse a SIMULINK y evaluarlo a tiempo real. En el contexto

de un humedal artificial este se puede dar con los sensores que se disponen para la medición de contaminantes. Fácilmente estos se pueden conectar a través de SIMULINK y registrar directamente dentro del aplicativo en tiempo real.

### 5.3.2 Apreciación personal y recomendaciones

Bajo un paradigma clásico de la mecánica que hemos heredado desde el siglo XVIII, la ciencia ha buscado aislar a los elementos de la naturaleza para estudiarlos. Claramente hasta hace no mucho, esto ha ido funcionando. Sin embargo, el momento en el que nos encontramos ahora, estos paradigmas cambian y las tendencias más modernas nos indican lo contrario. Desde una visión de la física cuántica aplicada al trabajo profesional y personal de las personas, Mel Schwartz nos invita a observar al universo y su naturaleza íntimamente conectada en su libro “*The Possibility Principle*”. Aplicando esta idea al presente trabajo, es justamente ese tipo de esfuerzos que se vienen haciendo hoy en día respecto a humedales. Buscar dejar de aislar los elementos y dejar de ser ‘*objetivos*’ y más bien integrar al ecosistema en su totalidad de ser posible. Anteriormente, los modelos usuales consideraban una descomposición exponencial perfecta. Hoy en día los modelos integran ciclos gracias a la comprensión de la influencia de la temperatura, lluvias, sequías, viento, etc. Así, como se resaltó en el presente documento, se sugieren emplear modelos diversos como ecuaciones diferenciales, sistemas estocásticos, optimización numérica, etc., con la finalidad de tratar de modelar de mejor forma la realidad. Así, como apreciación personal tras el proceso de construir el presente trabajo, queda la idea de dejar en manos de los futuros proyectistas y académicos heredar estos nuevos paradigmas. De la mano de la física cuántica, tomando en cuenta que todo en la naturaleza cambia constantemente y están íntimamente conectado, de forma holística podamos abarcar los grandes retos que aguardan en el futuro.

## REFERENCIAS

- Antonopoulos, V. Z., Papamichail, D. M., Mitsiou, K. A., Antonopoulos, V. Z., Papamichail, D. M., & Mitsiou, K. A. (2001). Statistical and trend analysis of water quality and quantity data for the Strymon River in Greece. *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(4), 679–691. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00304641>
- Aragones, D. G., Sanchez-Ramos, D., & Calvo, G. F. (2020). SURFWET: A biokinetic model for surface flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 723, 137650. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137650>
- Asai, M., & Wright, D. (2018). *Basics of Monte Carlo Simulation*. <https://indico.cern.ch/event/776050/contributions/3237662/attachments/1781016/2897449/MCIntroSaoPaulo.pdf>
- Browne, M. A., Dissanayake, A., Galloway, T. S., Lowe, D. M., & Thompson, R. C. (2008). Ingested Microscopic Plastic Translocates to the Circulatory System of the Mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environmental Science & Technology*, 42(13), 5026–5031. <https://doi.org/10.1021/es800249a>
- Carvalho, P. N., Arias, C. A., & Brix, H. (2017). *Constructed Wetlands for Water Treatment : New Developments. Figure 1*, 1–9. <https://doi.org/10.3390/w9060397>
- Chereque Moran, W. (1987). MECÁNICA DE FLUIDOS 2. En Wendor Chereque Moran (Ed.), 1 (pp. 94–95). Fondo Editorial PUCP. [http://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/41245/mecanica\\_de\\_fluidos\\_2.pdf](http://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/41245/mecanica_de_fluidos_2.pdf)
- Déniz Quintana, F. (2010). *Análisis estadístico de los parámetros DQO, DBO5 y SS de las aguas residuales urbanas en el ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa* [Universidad de las Palmas de Gran Canaria]. [https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/4858/3/0622200\\_00000\\_0000.pdf](https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/4858/3/0622200_00000_0000.pdf)
- FAO. (2016). *The state of the Worlds Land and water resources for food and agriculture*. 4(1), 64–75. <http://www.fao.org/3/i1688e/i1688e00.htm>
- Fondriest, E. I. (2013, noviembre 19). *Dissolved Oxygen - Environmental Measurement Systems*. <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/dissolved-oxygen/>
- Ghasemi, A., & Zahediasl, S. (2012). Normality tests for statistical analysis: A guide for non-statisticians. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, 10(2), 486–489. <https://doi.org/10.5812/ijem.3505>
- Gonzales, B. (2017). *Humedales, los riñones del planeta*. <https://www.terram.cl/2017/01/humedales-los-rinones-del-planeta/>

- Histogram plot - MATLAB.* (s/f). Recuperado el 29 de junio de 2020, de <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/matlab.graphics.chart.primitive.histogram.html>
- Hoffmann, D. H. (2007). *Ejemplo para un saneamiento ecoeficiente con reuso total de efluentes y biosólidos tratados , aplicado en el Colegio San Christoferus – Lima.* 1–10. <http://www.rotaria.net/peru3/rotaria/files/ponencias/EJEMPLO PARA UN SANEAMIENTO ECOEFICIENTE CON REUSO TOTAL.pdf>
- Howard, G., & Bartram, J. (2003). Sanitation and Health Programme. En *World Health Organization.* [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/diseases/WSH03.02.pdf?ua=1](http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/WSH03.02.pdf?ua=1)
- Janse, J. H., van Dam, A. A., Hes, E. M. A., de Klein, J. J. M., Finlayson, C. M., Janssen, A. B. G., van Wijk, D., Mooij, W. M., & Verhoeven, J. T. A. (2019). Towards a global model for wetlands ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 36(September 2018), 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.09.002>
- Kadlec, R. H. (1997). Deterministic and stochastic aspects of constructed wetland performance and design. *Water Science and Technology*, 35(5), 149–156. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00064-4)
- Kadlec, R., & Wallace, S. (2008). *Treatment Wetlands* (Second Ed.). <https://doi.org/10.1201/9781420012514>
- Mads Haahr. (2020). *Introduction to Randomness and Random Numbers.* <https://www.random.org/randomness/>
- Maldonado, V. (2005). *Uso de Wetlands para el tratamiento y reuso de aguas residuales domésticas* [Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/641>
- Masters, G., & Ela, W. P. (2008). *Introducción a la ingeniería medioambiental.* PEARSON EDUCATION, S.A. [http://www.ingebook.com.ezproxybib.pucp.edu.pe:2048/ib/NPcd/IB\\_Escritorio\\_Visualizar?cod\\_primaria=1000193&libro=3884](http://www.ingebook.com.ezproxybib.pucp.edu.pe:2048/ib/NPcd/IB_Escritorio_Visualizar?cod_primaria=1000193&libro=3884)
- MathWorks. (2020). *Random Number Generation - MATLAB & Simulink.* <https://www.mathworks.com/help/matlab/random-number-generation.html>
- Matsumoto, M., & Nishimura, T. (1998). Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudo-Random Number Generator. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 8(1), 3–30. <https://doi.org/10.1145/272991.272995>
- MINAM. (2010). Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM. *Normas Legales El Peruano*, 1–4. <https://doi.org/10.3354/meps08245>
- ONU. (2017). Work of the Statistical Commission pertaining to the 2030 Agenda for

- Sustainable Development (A/RES/71/313). *Resolution adopted by the General Assembly on 6 July 2017, 11371*(July), 1–25. [http://ggim.un.org/documents/a\\_res\\_71\\_313.pdf](http://ggim.un.org/documents/a_res_71_313.pdf)
- Philpott, T. (s/f). *You Need Phosphorus to Live—and We're Running Out – Mother Jones*. Recuperado el 27 de abril de 2019, de <https://www.motherjones.com/environment/2013/05/fertilizer-peak-phosphorus-shortage/>
- Pidre Bocado, J. R. (2010). *Influencia del tipo y granulometría del sustrato en la depuración de las aguas residuales por el sistema de humedales artificiales de flujo vertical y horizontal* [Universidad de Cádiz]. <https://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/15878>
- Pimentel, G., & Palacios, O. (2017). *El agua es un bien escaso que el Perú no sabe administrar*. <https://rpp.pe/peru/actualidad/la-falta-de-agua-potable-afecta-a-8-millones-de-peruanos-noticia-998969>
- Rabat, J., & Trapote, A. (2016). Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración. En *Universidad de Alicante*. <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm10/tfm10-jorge-rabat-blazquez.pdf>
- Ramsar Convention. (2016). *An Introduction to the RAMSAR convention on wetlands*. [www.larissab.fr](http://www.larissab.fr)
- Reed, S. C., Crites, R. W., Middlebrooks, J., & Group, F. (2006). *Wastewater Systems*. Taylor & Francis Group, LLC. <https://www.taylorfrancis.com/books/natural-wastewater-treatment-systems-ronald-crites-joe-middlebrooks-sherwood-reed/10.1201/9781420026443>
- Roca, J. L. (2016). *Guía de Laboratorio PUCP - Mecánica de Fluidos*. 17–20. <https://doi.org/10.4000/books.ifea.7217>
- Rousseau, D. P. L., Vanrolleghem, P. A., & De Pauw, N. (2003). Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: a review. *Department of Applied Ecology and Environmental Biology, Ghent University, Gent, Belgium, 1*, 1–6.
- Sabokrouhiyeh, N., Bottacin-Busolin, A., & Marion, A. (2016). *Assessment of the nutrient removal effectiveness of free water surface wetlands with different configurations*. 787–793. <https://doi.org/10.1201/9781315644479-125>
- Siniscalchi, A., Di Maggio, J., Estrada, V., & Diaz, M. S. (2020). Integrated mathematical models for drinking water reservoirs and constructed wetlands as a tool for restoration planning. *Journal of Hydrology*, 586(March), 124867. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124867>
- The Mosaic Company. (s/f). *Efficient Fertilizer Use Guide Nitrogen | Mosaic Crop Nutrition | Mosaic Crop Nutrition*. Recuperado el 28 de abril de 2019, de

<https://www.cropnutrition.com/efu-nitrogen>

US EPA. (s/f-a). *Wetland Functions and Values*. Recuperado el 30 de septiembre de 2018, de <http://www.epa.gov/watertrain>.

US EPA, O. (s/f-b). *What is a Wetland?* Recuperado el 8 de abril de 2020, de <https://www.epa.gov/wetlands/what-wetland>

Verhoeven, J. T. A., Beltman, B., & Bobbink, R. (2006). *Wetlands and Natural Resource Management* (D. Czeschlik (Ed.); 190a ed.). Springer.

Vigiak, O., Grizzetti, B., Udias-Moinelo, A., Zanni, M., Dorati, C., Bouraoui, F., & Pistocchi, A. (2019). Predicting biochemical oxygen demand in European freshwater bodies. *Science of the Total Environment*, 666, 1089–1105. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.252>

WorldWeatherOnline. (s/f). *Chincheró, Peru Weather Averages*. Recuperado el 6 de octubre de 2018, de [https://www.worldweatheronline.com/v2/weather-averages.aspx?locid=1792064&root\\_id=1787009&wc=local\\_weather&map=~/chincheró-weather-averages/puno/pe.aspx](https://www.worldweatheronline.com/v2/weather-averages.aspx?locid=1792064&root_id=1787009&wc=local_weather&map=~/chincheró-weather-averages/puno/pe.aspx)

## APÉNDICE

1. ANEXO I: DEL APLICATIVO: GUÍA DE USUARIO Y PROGRAMADOR
2. ANEXO II: DE LA IMPLEMENTACIÓN EN CAMPO
3. ANEXO III: COMPLEMENTARIO

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARAMÉTRICO PARA EL  
DISEÑO EFICIENTE DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE  
FLUJO SUPERFICIAL A TRAVÉS DEL SOFTWARE MATLAB**

**ANEXO I: DEL APLICATIVO HUMEPUCP**

**AUTOR:**

**Raúl Sebastian Acuña Letona**

**ASESOR**

**Federico Alexis Dueñas Dávila, PhD.**

Diciembre 2020



## TABLA DE CONTENIDOS

1. ANEXO 1: MANUAL DE USO DEL APLICATIVO HUMEPUCP .....	1
1.1 Instalación Del Programa.....	1
1.2 Componentes Primarios .....	5
1.3 Diseño De Un Humedal Artificial .....	10
1.3.1 Diseño de un área superficial óptima .....	10
1.3.2 Obtención y lectura de un diseño eficiente .....	13
1.3.3 Generación de un reporte de diseño .....	14
1.3.4 Visualización de Datos y Exportación de Gráficas.....	16
1.4 Seguimiento/Mantenimiento De Un Humedal Artificial .....	17
1.4.1 Colocación de datos .....	17
1.4.2 Generación de gráficas y prueba de hipótesis .....	17
1.4.3 Análisis Estocástico para el seguimiento de un humedal artificial .....	21
2. ANEXO 2: MANUAL DE USO del aplicativo HUMEPUCp – guía del programador.....	25
2.1 estructura del código empleado.....	25
2.1.1 Workspace.....	26
2.1.2 Empleo 3D de Perillas – Knobs .....	28
2.1.3 Properties .....	30
2.1.4 Generación de un reporte PDF.....	31
2.2 lecciones aprendidas: optimización y limpieza de código .....	34
2.2.1 Trabajo Cells, Arrays y Matrices .....	34
2.3 Mejorando el programa: hacia un aplicativo perfeccionado .....	36
2.3.1 Enfoque Estadístico.....	36
2.3.2 Enfoque Estocástico.....	37
2.3.3 Uso compartido y la teoría de juegos.....	37
3. ANEXO 3: código empleado appdesigner – matlab .....	37

1.1. PROPIEDADES GENERALES .....	37
1.1. DISEÑO DE UN HUMEDAL.....	42
1.1. CALIBRACIÓN Y MANTENIMIENTO.....	46
1.2. RESULTADOS DEL DISEÑO .....	51
FUENTES CITADAS.....	79



## 1. ANEXO 1: MANUAL DE USO DEL APLICATIVO HUMEPUCP – GUIA DE USUARIO

### 1.1 INSTALACIÓN DEL PROGRAMA

El usuario debe tener instalado MATLAB® en su computador. De no ser el caso, MATLAB ofrece una licencia gratuita por 30 días de prueba. Basta con crear un usuario e instalar el programa. Puede dirigirse al siguiente link de descarga de la versión más actualizada: <https://www.mathworks.com/downloads/>

Asimismo se sugiere indagar si su institución o empresa cuenta con una licencia de MATLAB para poder acceder a una licencia por tiempo prologando así como mayores beneficios. Puede verificar si su institución está afiliada en el siguiente enlace: <https://www.mathworks.com/academia/tah-support-program/eligibility.html>

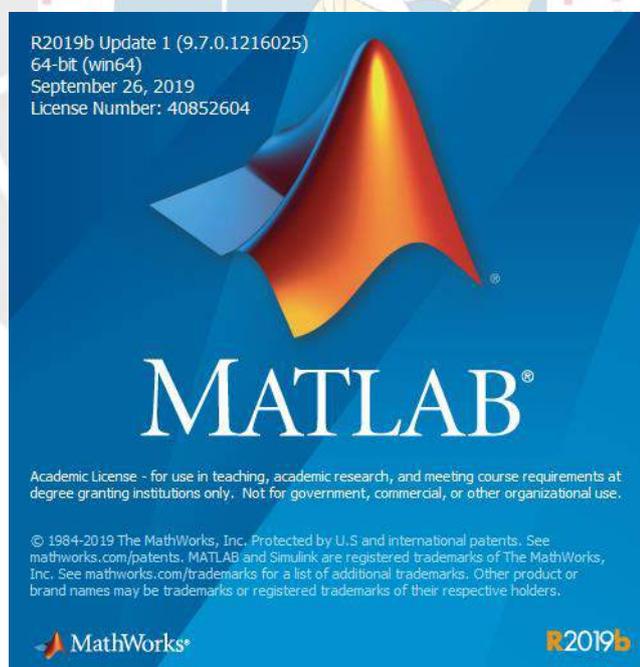
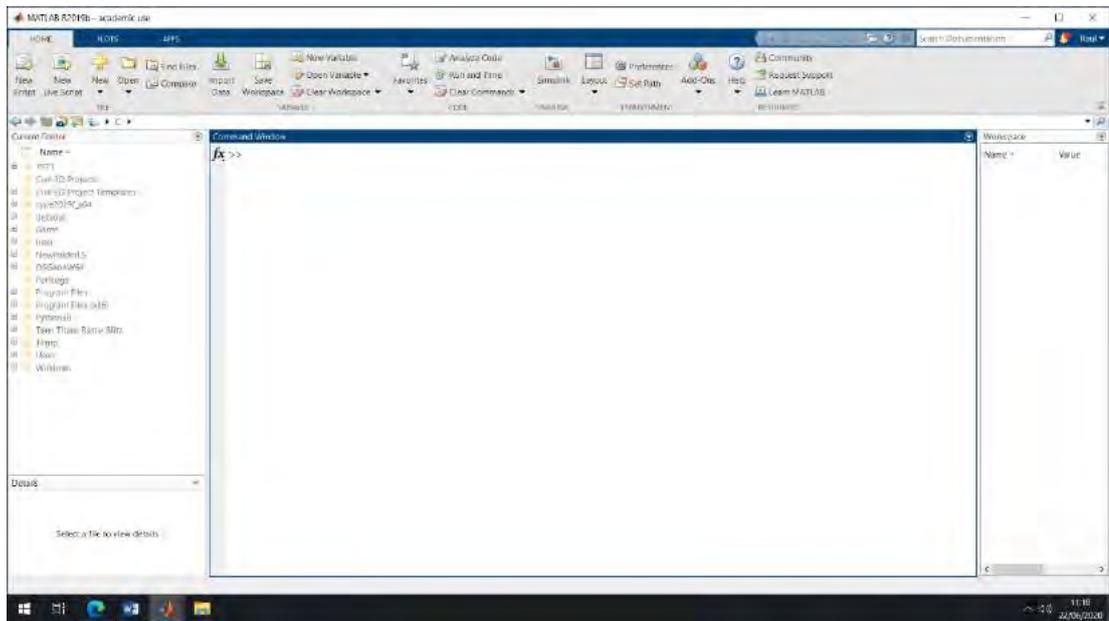
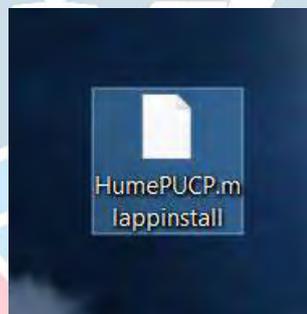


Figura 1. Inicio de MATLAB R2019b

El programa instalado completamente debe presentar su pantalla de inicio de la siguiente forma:

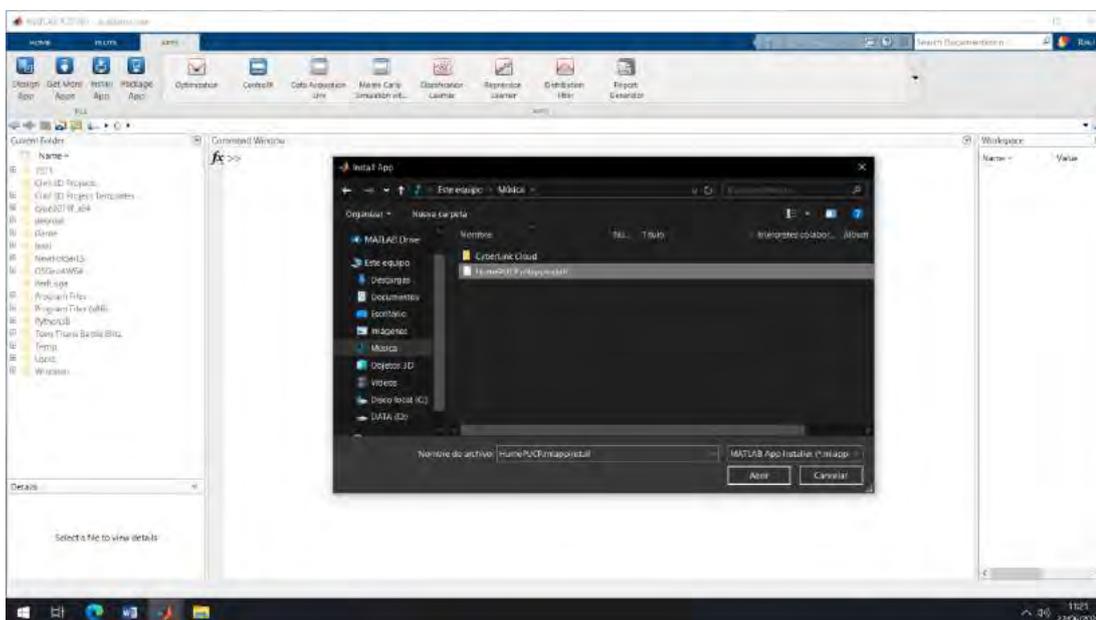


Al usted contar con el presente documento deberá encontrar el instalador el cual es un archivo con la extensión **.mlappinstall** o lo descargara en: <https://bit.ly/3k2hOs7> .



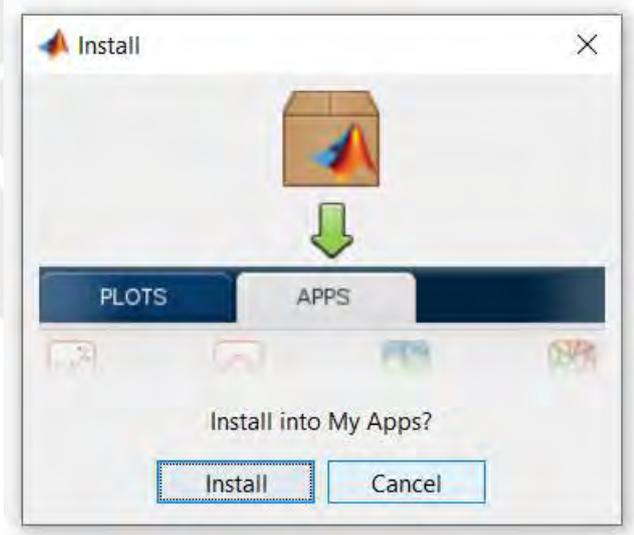
**Figura 3. Título del archivo .mlappinstall**

Deberá dirigirse a la parte superior, en la tercera pestaña de la pantalla principal de MATLAB “APPS”. En APPS deberá hacer click en el icono “Install Apps”. Deberá llevarlo a una ventana para seleccionar el archivo anteriormente mencionado así:



**Figura 4. Registro del archivo para la instalación**

A continuación le da click en “Abrir” y luego click en instalar:



**Figura 5. Mensaje de instalación del aplicativo**

Seguidamente le deberá aparecer la siguiente información:



Figura 6. Título de figura MATLAB

Le da click en el menú desplegable de “Apps” y ya debería tener instalado el aplicativo HumePUCP.

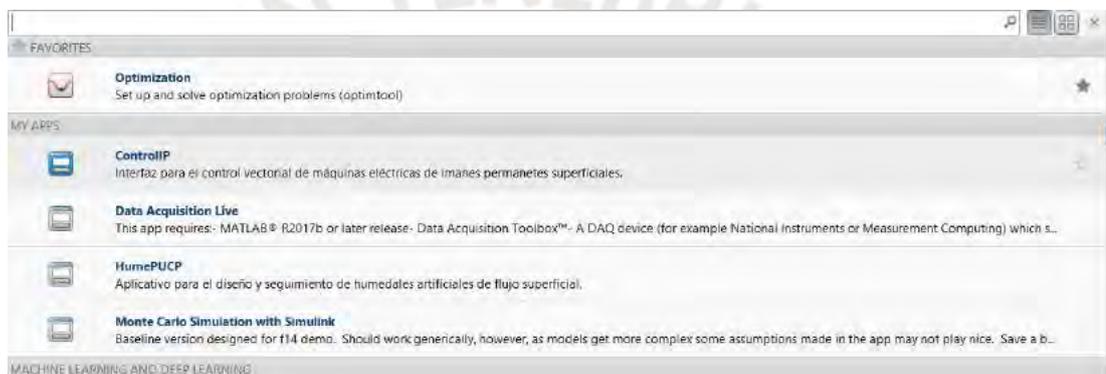


Figura 7. Instalación completa de HumePUCP en MATLAB

Finalmente, le da click y se encontrará con la pantalla principal del aplicativo:

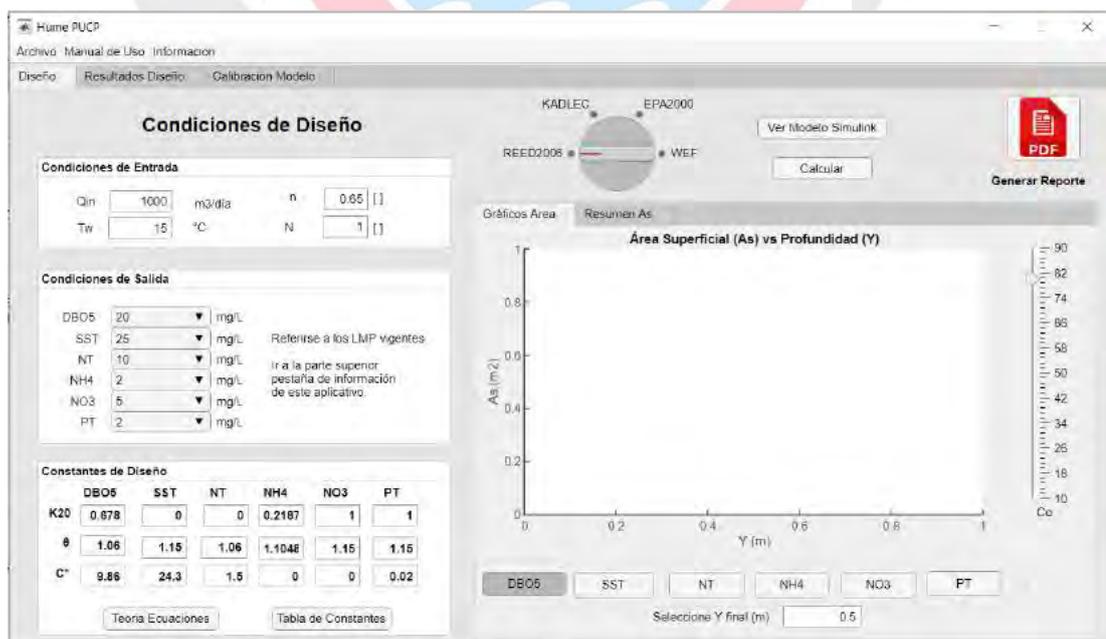


Figura 8. Página principal de HumePUCP – Instalación completa

Las limitaciones del presente aplicativo susciben a las exigidas por MATLAB. Para tal refererice a la documentación complementaria al momento de instalar el programa:

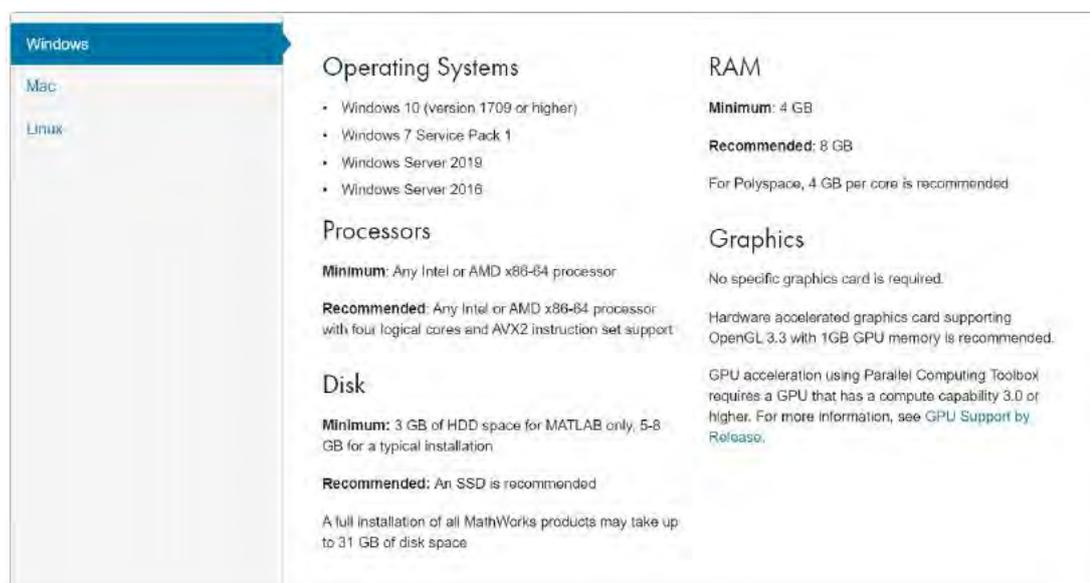


Figura 9. Requerimientos de sistema según MATLAB 2020a

<https://www.mathworks.com/support/requirements/matlab-system-requirements.html>

De tener algún inconveniente contactarse con el autor vía: [raul.acuna@pucp.edu.pe](mailto:raul.acuna@pucp.edu.pe)

## 1.2 COMPONENTES PRIMARIOS

La parte superior corresponde a la barra de título Hume PUCP. En la parte inferior cuenta con una barra de menús desplegables donde se cuenta con 3 pestañas principalmente: Archivo, Manual de Uso e Información.

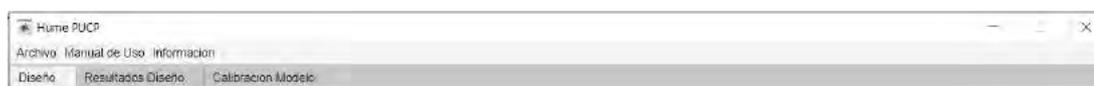


Figura 10. Barra de Menú - HumePUCP

El archivo menú se despliegan las opciones comunes de Abrir, Guardar, Guardar como y Nuevo documento. Si usted previamente ha trabajado con el aplicativo y desea incorporar valores anteriormente guardados haga click en Abrir. A continuación, se muestra una captura de las opciones desplegables.

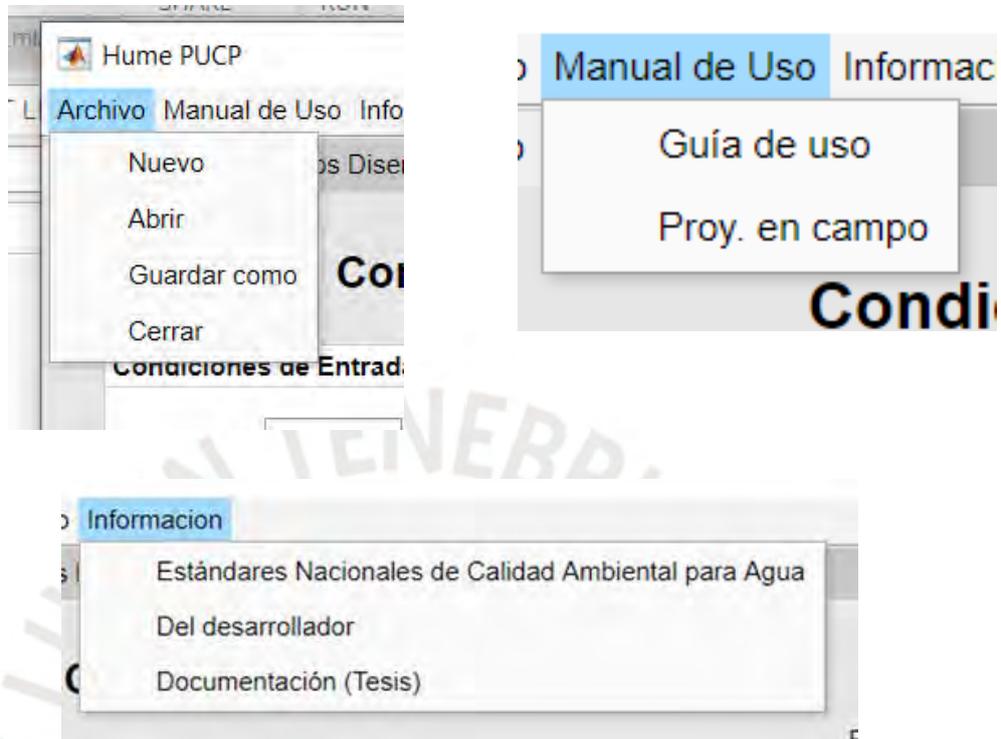


Figura 11. Componentes de la barra de menú

La pestaña **Manual de Uso** comprende la Guía de Usuario que corresponde al presente documento y al Proyecto en Campo que corresponde al segundo Anexo del trabajo de tesis da origen a este aplicativo.

Finalmente, el menú **Información** despliega información relevante para el uso del aplicativo. Están los estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua emitido por (ECA) emitidos por el Ministerio del Ambiente a través de periódico oficial El Peruano.

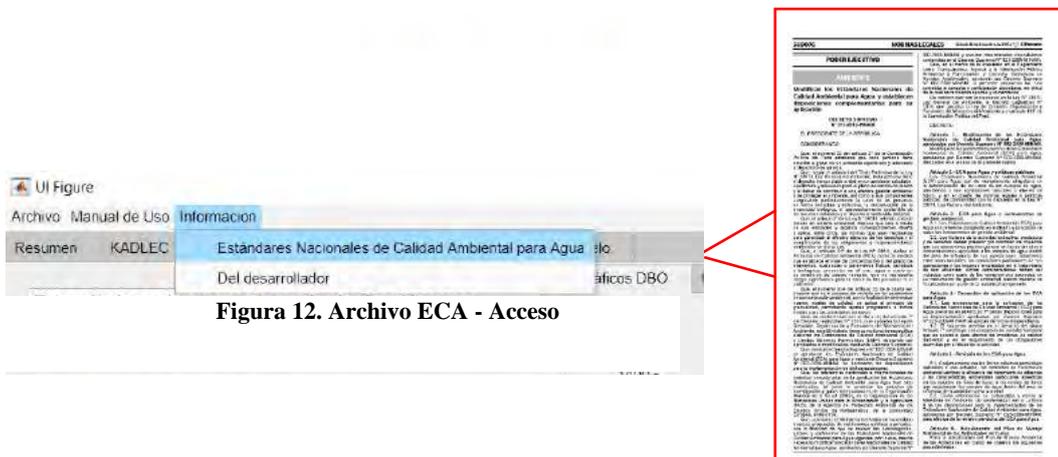
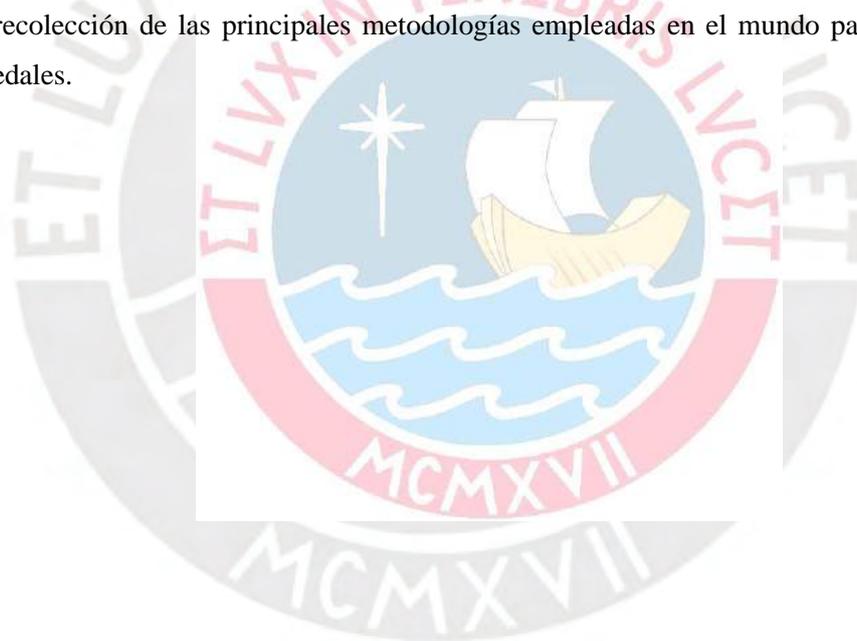


Figura 12. Archivo ECA - Acceso

Luego, sigue información del Desarrollador para su contacto de ser el caso. Finalmente, se ha adjuntado la tesis la cual da origen al presente trabajo. Allí encontrará los sustentos teóricos y prácticos, así como las consideraciones técnicas para la concepción del presente aplicativo.

Luego, como un trabajo en ingeniería, el proceso de construcción de un humedal artificial sigue un proceso planificación, construcción y mantenimiento. El aplicativo permite hacer un seguimiento en las dos fases importantes de la construcción de un humedal.

Por un lado, el **Diseño** sigue las premisas que los pioneros en el diseño de humedales hicieron. Es decir, se diseñan tomando en cuenta modelos tipo PFR (*Plug Flow Reactor*) con ecuaciones de eliminación de contaminante de primer grado. Para más detalle referirse al trabajo de Tesis. A continuación, se presenta el resumen que acompaña el diseño de un humedal. Se ha hecho una recolección de las principales metodologías empleadas en el mundo para el diseño de humedales.



## RESUMEN METODOLÓGICAS PARA EL DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUPERFICIAL

### 1. Metodología Sherwood C. Reed

Este método es el mayormente empleado. Considera una descomposición de contaminante de 1er orden a través de un modelamiento en un reactor tipo pistón.

#### Modelos para DBO<sub>5</sub>, NH<sub>4</sub> Y PT

$$A_s = Q_A \ln \left( \frac{C_o}{C_e} \right) \frac{1}{K_T y n}$$

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{(-K_T t)}$$

$$K_T = K_{20} \Theta^{T_w - 20}$$

Ce	Concentración de salida (mg/l)	Θ	Constante de Temperatura II (-)
Co	Concentración de entrada (mg/l)	T <sub>w</sub>	Temperatura del agua (°C)
K <sub>20</sub>	Constante de Temperatura (d <sup>-1</sup> )	y	Profundidad del humedal (m)
Q	Caudal (m <sup>3</sup> /d)	n	Porosidad del humedal (-) [0,65 ~ 0,75]

#### Modelos para NO<sub>3</sub>

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp \left( \frac{-K_p}{CH} \right)$$

$$A_s = \frac{(b)(Q) \ln (C_o/C_e)}{K_p}$$

K <sub>p</sub>	Constante de Remoción (cm/d)	b	Factor de conversión [100cm/m]
CH:	Carga Hidráulica (cm/d)		

### 2. Metodología Kadlec y Knight

Este método es el mayormente empleado. Considera una descomposición de contaminante de 1er orden a través de un modelamiento en un reactor tipo pistón. El modelo se aplica a todos los contaminantes: DBO<sub>5</sub>, SST, NT, PT, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub> con sus respectivas ecuaciones (Ver tabla de constantes).

$$\frac{C_e - C^*}{C_o - C^*} = e^{-\frac{K_t}{CH}}$$

$$A_s = \frac{Q_o * 365}{K_t} \ln \left( \frac{C_o - C^*}{C_e - C^*} \right)$$

C*	Concentración de fondo (mg/l)	HLR	Carga Hidráulica (cm/d)
K <sub>t</sub>	Constante de Temperatura (d <sup>-1</sup> ) (ver Modelo Reed)		

### 3. Metodología WEF MOP FD-16

Modelo empleado por el Water Environment Federation de los Estados Unidos, Manual Of Practice (MOP). Modelos para Nitrógenos Totales y Amonio (NH<sub>4</sub>) respectivamente.

$$A_s = \frac{100 Q}{\exp[1,527 \ln(C_e) - 1,050 \ln(C_o) + 1,69]}$$

$$A_s = \frac{100 Q}{[0,645(C_e) - 0,125(C_o) + 1,129]}$$

$$C_e = 0,193(C_o) + 1,55 \ln(CH) - 1,75$$

$$C_e = \frac{(18,31)(C_o)(Q)}{A_s} - 0,16063$$

### 4. Metodología EPA 2000

Environment Protection Agency, igualmente alocada en los EEUU. Aplicable solo a la remoción de DBO<sub>5</sub>. El modelo asume una descomposición de la forma:

$$A_s = \frac{Q * t}{y * n}$$

$$\frac{C_e}{C_o} = \frac{1}{(1 + t * K_B)^N}$$

K <sub>B</sub>	Constante de Remoción (cm/d)	t	Tiempo de Retención Hidráulico [d]
----------------	------------------------------	---	------------------------------------

**Figura 13. Resumen de metodologías y ecuaciones incorporadas en HumePUCP**

Asimismo, dichas ecuaciones no estarían completas si no se le adjuntan las respectivas constantes de diseño. Estas provienen de ajustes matemáticos y regresiones estadísticas que en el mejor de los casos proyecta con la menor incertidumbre el funcionamiento de un humedal. A continuación, se muestra igualmente el resumen de dichas constantes, así como sus correspondientes unidades.

<b>HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL - TABLA DE CONSTANTES DE DISEÑO</b>						
<b>1.- Metodología Sherwood C. Reed</b>						
	DBO	SST	NT	NH4	NO3	PT
K20 (m/año)	0.678	-	-	0.2187	1	1
$\theta$	1.06	-	-	1.1048	1.15	1.15
<b>2.- Metodología Kadlec y Knight</b>						
	DBO	SST	NT	NH4	NO3	PT
K20 (m/año)	34	1000	22	18	35	12
$\theta$	1	1.065	1.05	1.04	1.09	1
C* (mg/l)	$3.5+0.053C_o$	$5.1+0.16C_o$	1.5	0	0	0.02
<b>3.- EPA/WEF MOP FD-16</b>						
<i>Tomar valores referenciales de 1.- Metodología Sherwood C. Reed.</i>						

**Figura 14. Resumen de constantes sugeridas por autor - HumePUCP**

*Nota:* Ambos documentos se pueden acceder desde la pestaña diseño como se detalla más adelante en esta guía práctica.

El aplicativo busca reducir esta brecha de incertidumbre, sin embargo, para esta primera etapa de diseño si el usuario no cuenta con otras constantes de referencia puede tomar las que se presentan en esta etapa de diseño.

Seguidamente, la etapa de **Mantenimiento** optimiza y retroalimenta la etapa de **Diseño** de un humedal. Si el autor cuenta con constantes de diseño ya establecidas de algún proyecto aledaño a la zona, puede implementar esta herramienta sin la necesidad de haber construido aún el humedal. Se entienden que existe una plétora de variables que influyen el comportamiento de un humedal; desde la temperatura, pendiente, alocaación de plantas, tipo de plantas, profundidad

de diseño, caudal, distribución de riego, etc. Así, las constantes de diseño no siguen las aproximaciones iniciales que se hacen siguiendo a los autores inicialmente mencionados. Por ello, el usuario ahora en la etapa de **Mantenimiento** puede escoger tomar un proyecto aledaño junto a la data. Iterando con las herramientas del aplicativo logrará afinar estas constantes de diseño y podrá con mayor seguridad, respaldo estadístico y rigurosidad científica proyectar un humedal en campo.

### 1.3 DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL

#### 1.3.1 Diseño de un área superficial óptima

**A:** El usuario empieza con algunas asunciones básicas para el diseño del humedal, tales asunciones van desde el caudal, la rugosidad de Manning empleada, la temperatura promedio de la zona (una primera aproximación), etc. Toda esta información es cargada en la estaña “Constante de Diseño”.

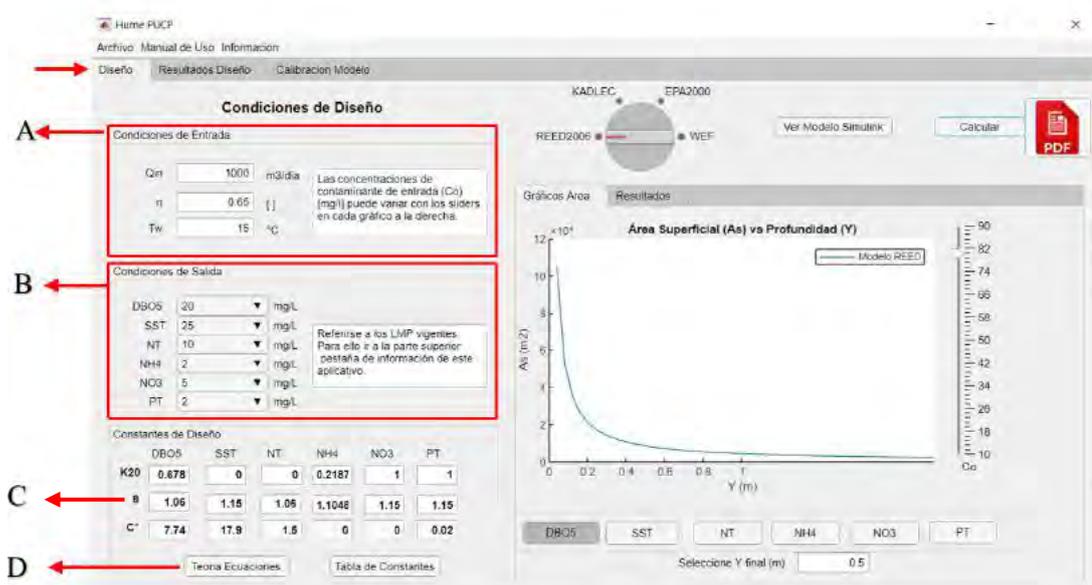
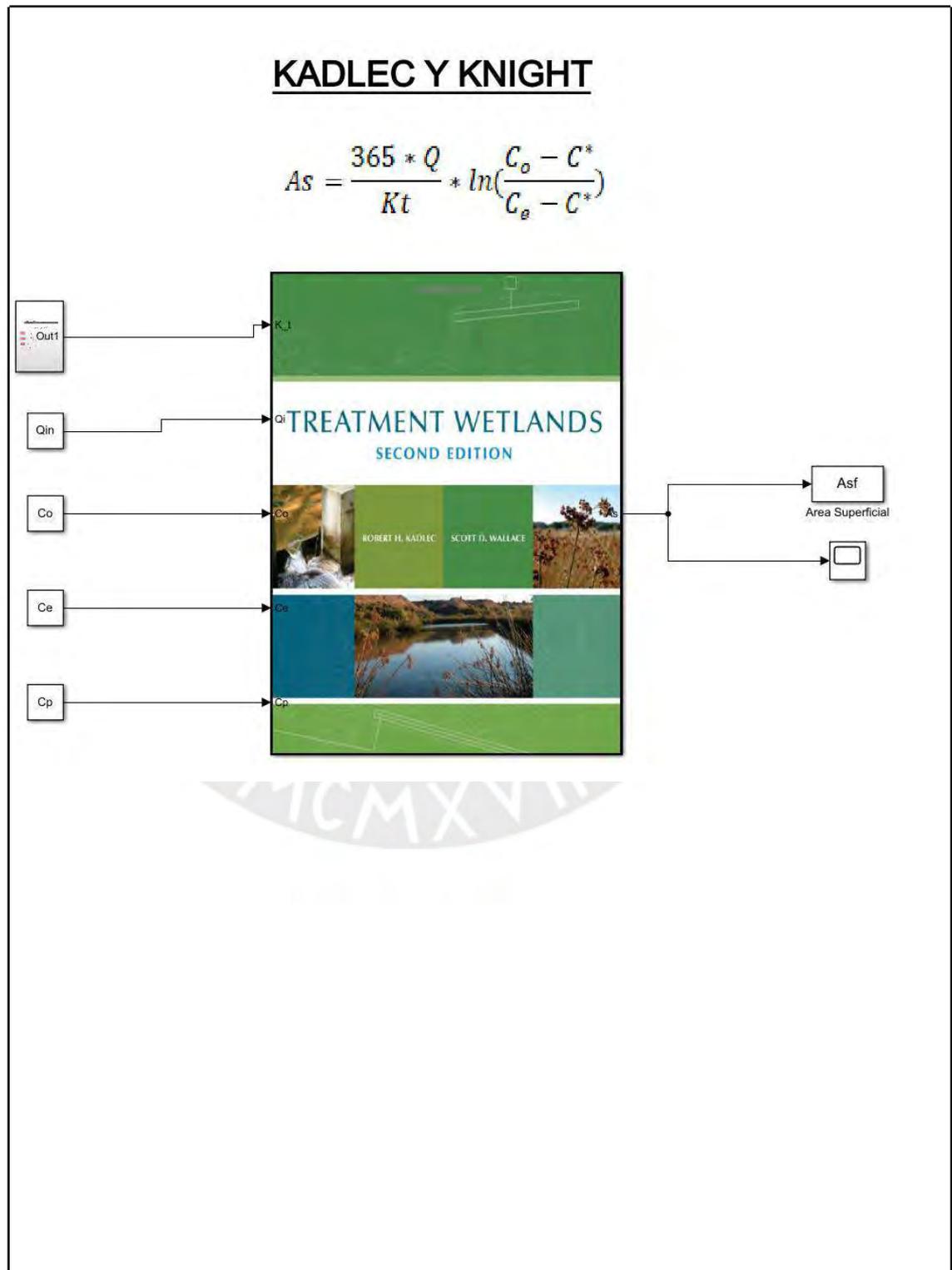


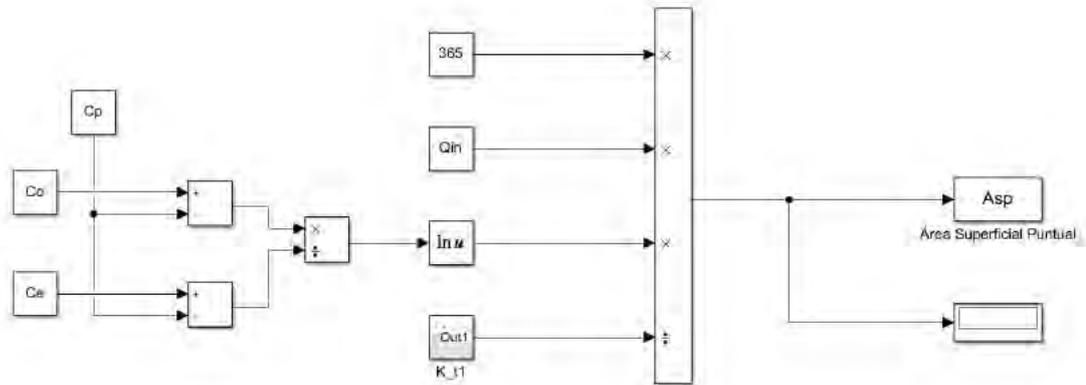
Figura 15. Componentes de la pestaña Diseño de HumePUCP

**B:** Las condiciones de salida netamente responden a los ECA mencionados anteriormente en este documento. Asimismo, estas consideraciones son totalmente subjetivas en función a los alcances que proyecta el usuario. La escala se ha acomodado en función a las principales referencias del documento del ECA. De desear cambiar estas constantes “pre-alocadas” o fijadas el usuario puede interactuar con el Modelo en Simulink.

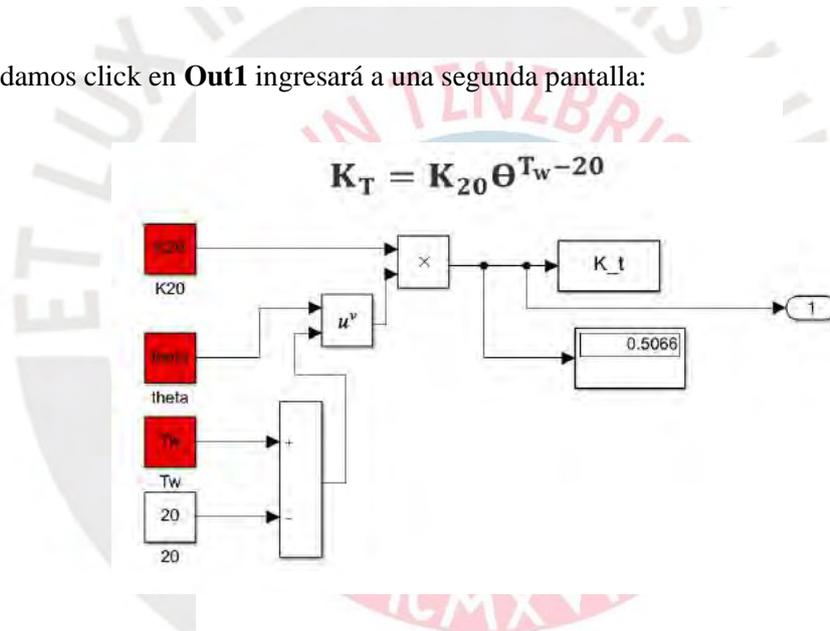
El modelo en SIMULINK corresponde a una interpretación gráfica de las ecuaciones empleadas. El *Knob* o perilla cambia junto con el modelo de Simulink que se desea visualizar. Así, para el caso de la captura de pantalla si se desea visualizar el modelo de Kadlec y Knight obtendrá lo siguiente:



## FUNCIÓN PARA OBTENCIÓN DE VALOR PUNTUAL



Si le damos click en **Out1** ingresará a una segunda pantalla:



Así, los valores en rojo corresponden a los valores de entrada que el programa reconoce desde el GUI (Graphic User Interface) o pantalla principal de nuestro aplicativo. Si el usuario desea cambiar estos valores a diferencia de lo pre establecido en la pantalla principal solo debe editar el modelo. Asimismo, si el usuario desea mejorar el modelo más allá de lo propuesto, está invitado a hacerlo. Simulink es una amplia herramienta amigable (*user – friendly*) para el desarrollo de sistemas más complejos.

### 1.3.2 Obtención y lectura de un diseño eficiente

De la figura Figura 15 en el apartado C se observan todas las constantes de diseño involucradas. Es necesario referirse a los dos botones del apartado D para tener mayor referencia. El usuario debe interactuar con la herramienta y con el resto de datos para cuantificar a priori los valores de área superficial óptimos. El gráfico a la derecha corresponde a un gráfico  $A_s$  (área superficial vs  $Y$ : profundidad). El usuario puede observar conforme la profundidad de diseño se incrementa el área superficial que requerirá limpiar dadas las concentraciones de entrada  $C_o$  (concentración sub- cero) y  $C_e$  (concentración de salida). Finalmente, para cada iteración el usuario selecciona la profundidad aplicada para obtener sus resultados visualmente en la pestaña “Resultados”. Cabe destacar que no todas las metodologías ofrecen modelos para todos los contaminantes. El necesario que el usuario se familiarice con los modelos previo a su análisis de lo contrario “saturará” las ecuaciones y obtendrá resultados incongruentes (por ejemplo: áreas negativas).

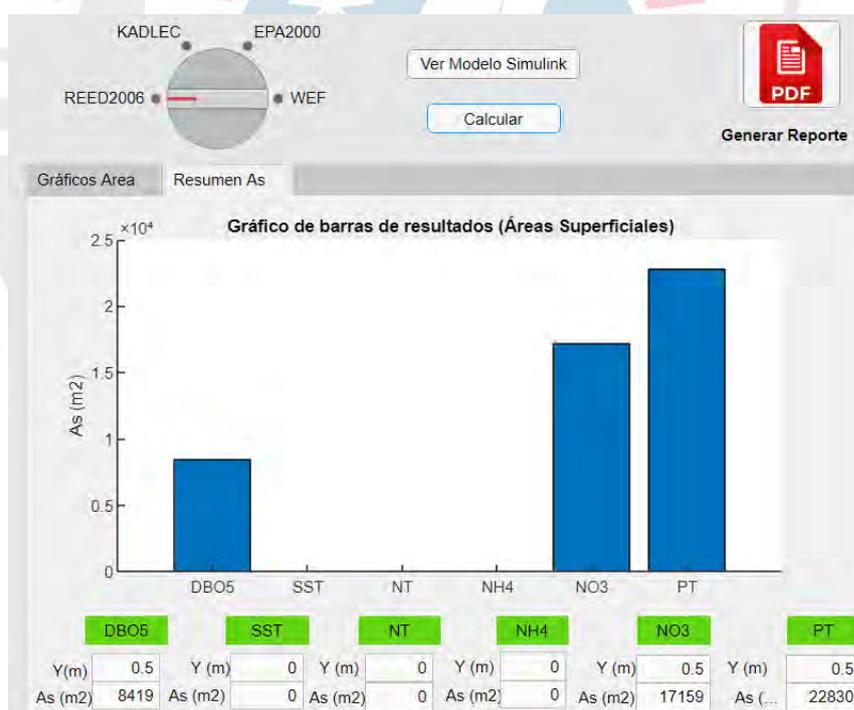
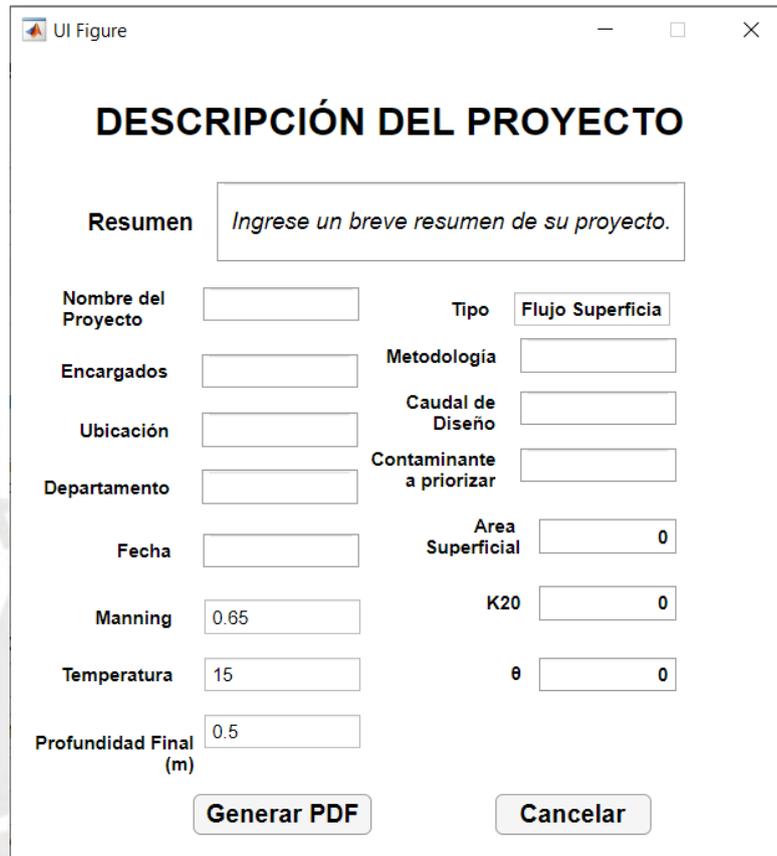


Figura 16. Resumen de Resultados Metodología Reed.

Una vez que el usuario tenga confianza de los valores y constantes empleados puede hacer click en el botón “Generar Reporte” para generar el siguiente documento:

### 1.3.3 Generación de un reporte de diseño



UI Figure

## DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

**Resumen**

**Nombre del Proyecto**  **Tipo**

**Encargados**  **Metodología**

**Ubicación**  **Caudal de Diseño**

**Departamento**  **Contaminante a priorizar**

**Fecha**  **Area Superficial**

**Manning**  **K20**

**Temperatura**   **$\theta$**

**Profundidad Final (m)**

Figura 17. Generar reporte con HumePUCP

La Figura 17 recoge *a priori* los valores seleccionados para Manning, Temperatura y Profundidad Final del aplicativo original; sin embargo, estos espacios son editables. Asimismo, el resto de campos deberán ser llenados por el usuario y finalmente dar click en “GENERAR PDF”. El documento luce de la forma:



## Ficha Técnica - HUMEPUCP

---

### DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Resumen:

<p><b>Nombre del Proyecto:</b></p> <p><b>Encargados:</b></p> <p><b>Ubicación:</b></p> <p><b>Departamento:</b></p>	<p><b>Tipo:</b> Humedal Artificial de Flujo Superficial</p> <p><b>País:</b> Perú</p> <p><b>Fecha:</b></p>
---	---

---

### DETALLES TÉCNICOS

<p><b>Modelo:</b></p> <p><b>Área Superficial (As):</b></p> <p><b>Profundidad de diseño:</b></p> <p><b>Caudal de Ingreso:</b></p>	<p><b>Rugosidad de Manning (n):</b></p> <p><b>Contaminante de mayor relevancia:</b></p>
--	---

---

### CONSTANTES DE DISEÑO

**K<sub>20</sub>:**

**Q:**

**Temperatura Promedio (°C):**

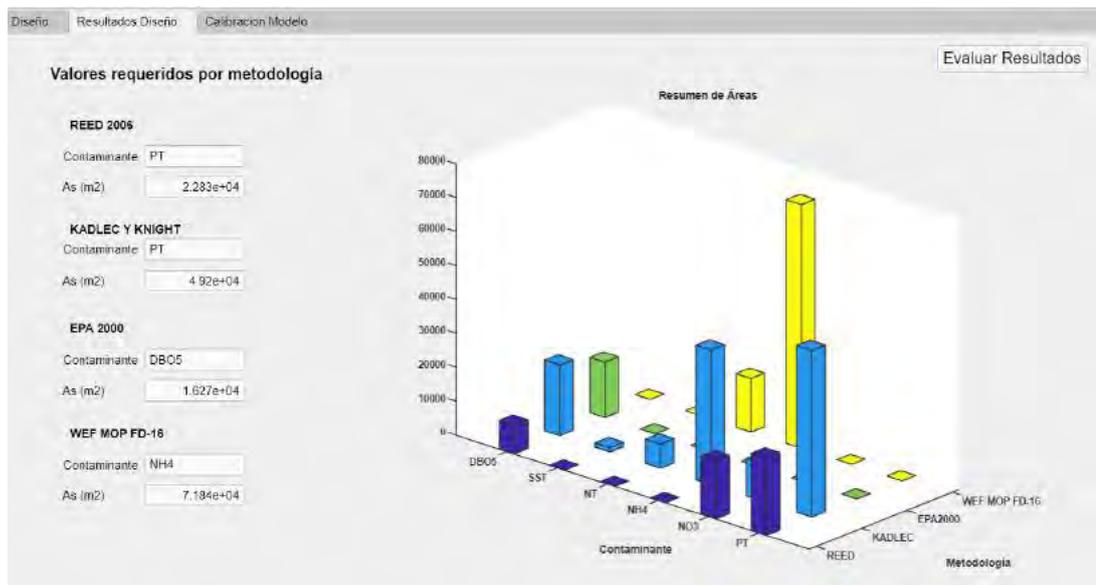
  

*Nota: En caso desee aportar a la base de datos de humedales artificiales en el Perú, enviar su ficha técnica a [raul.ocuna@pucp.edu.pe](mailto:raul.ocuna@pucp.edu.pe).*

Figura 18. Modelo de Ficha Técnica con los datos básicos del HumePUCP

Si usted desea ampliar la información que aparece por defecto, igualmente dentro de los archivos del aplicativo deberá encontrar la plantilla con el nombre FICHATÉCNICA.docx. Es importante no sobrescribir dicho documento plantilla para evitar conflicto con la programación del aplicativo.

### 1.3.4 Visualización de Datos y Exportación de Gráficas



**Figura 19. Visualización de área superficial óptima de diseño – HumePUCP**

La Figura 19 muestra una primera aproximación a los datos que MATLAB exporta desde la pestaña Diseño. Esta herramienta interactiva nos permita tomar una decisión más asertiva sobre la extensión de nuestro humedal. Finalmente, para la ejecución de informes y otra documentación esta gráfica puede exportarse en alta resolución pasando el mouse por la derecha superior de la gráfica. Deberá obtener lo siguiente:



**Figura 20. Herramientas de exportación de imágenes en MATLAB**

Es importante notar en este punto que MATLAB no exige licencias para la exportación y empleo de este tipo de data. La primera opción tomará la captura de pantalla deseada y deberíamos obtener nuestra captura en alta resolución debidamente acotado. Por último, en la

pantalla izquierda se hace una lectura de los valores máximos (o requerimientos mínimos) por metodología. Desde aquí el usuario podrá hacer inferencias sobre la apertura de cada metodología, sus exigencias y sus resultados.

#### 1.4 SEGUIMIENTO/MANTENIMIENTO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL

A continuación se resaltan los siguientes puntos:

##### 1.4.1 Colocación de datos

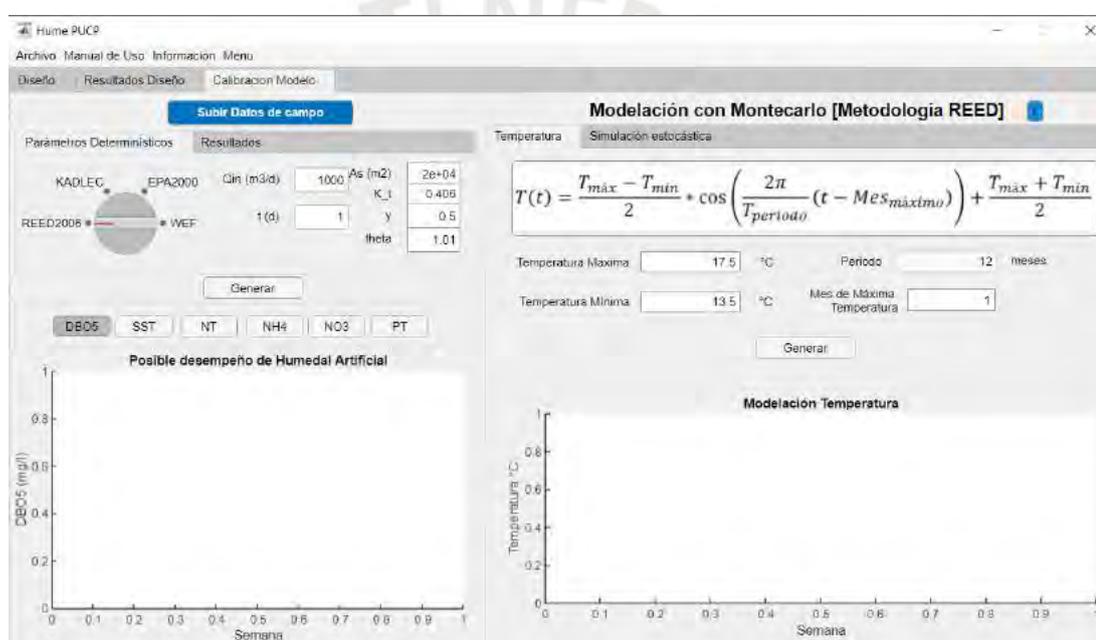


Figura 21. Calibración del Modelo: Seguimiento a un humedal artificial

##### 1.4.2 Generación de gráficas y prueba de hipótesis

Para generar datos es necesario incorporarlos dentro del aplicativo. Para ello debe referirse al botón azul “Subir Datos de campo” lo cual lo referirá a la siguiente pestaña.

FASE MANTENIMIENTO - HUMEDAL ARTIFICIAL				Proyectista:	UNITRAR
Fecha de muestreo:-				Técnico especialista:	Ing. Yonatan Maldonado
Muestra tipo ENTRADA / SALIDA				Entidad Responsable:	UNI
<b>DBO [mg/l]</b>					
#	MES	ENTRADA	[ ] SALIDA		
1	1	121.2	26.5		
2	2	185.0	10.0		
3	3	94.3	50.5		
4	4	84.3	18.7		
5	5	112.5	15.0		
6	6	54.0	14.0		
7	7	120.0	22.0		
8	8	165.5	25.0		
9	9	125.0	27.0		
10	10	244.5	48.0		

Figura 22. Ingreso de datos para el seguimiento de un humedal. Datos recogidos de (Maldonado, 2005)

Aquí puede seleccionar cuantas casillas desee y subir los datos de un humedal con cual usted tenga una base de datos. El programa reconoce únicamente todos los elementos después de la fila 12 de nuestra hoja de Excel por lo que una edición de esta no es conveniente. Una vez colocados estos datos hacer click en “generar” y deberá obtener una gráfica como se muestra a continuación:

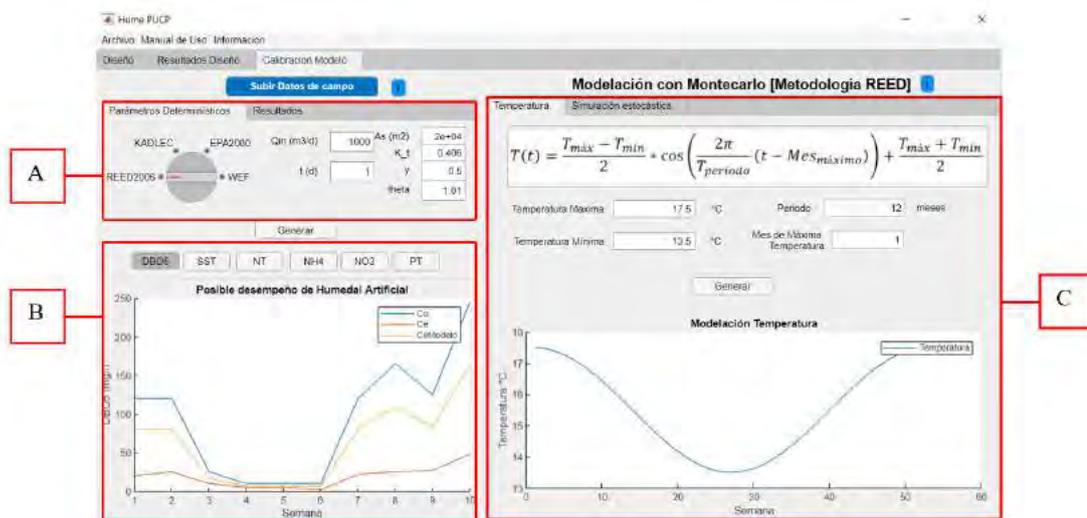


Figura 23. Calibración del modelo de humedal artificial

**A:** Deberá haber colocado en primer lugar datos de entrada o ideas o concepciones de lo que prevé que tendrá el humedal. Estos valores van desde un aproximado del área superficial que obtuvo de la pestaña anterior, las constantes de diseño, etc. Nuevamente, es importante que consulte con la tabla de ecuaciones para obtener una mejor comprensión de los procesos que se llevan a cabo (ecuaciones y asunciones empleadas).

**B:** La gráfica inferior muestra 3 curvas principalmente.

- **Co:** Concentración de Entrada
- **Ce:** Concentración de Salida
- **Cm:** Concentración del modelo en función a la lectura de la concentración de entrada.

Finalmente, se entiende que una curva parecida Ce parecida a una curva Cm indicará que nuestro modelo (constantes y valores colocados) son una primera buena aproximación por lo que podemos tener confiabilidad sobre nuestras suposiciones iniciales. Sin embargo, para añadir rigurosidad académica se ha incorporado una prueba de hipótesis para el contaminante de DBO5. En la pestaña **Resultados** de **A** podrá visualizar lo siguiente:



**Figura 24. Resultados de un análisis de la data implementada.**

Aquí se muestra un resumen de la media, desviación estadística de la *muestra* y la eficiencia encontrada. La eficiencia sigue la fórmula:

$$\eta = 100 * \left( \frac{\overline{C_o} - \overline{C_e}}{\overline{C_o}} \right)$$

**Figura 25. Eficiencia de un humedal artificial en función a los promedios.**

La eficiencia le permitirá comparar el desempeño de su humedal frente a otros modelos implementados. Asimismo, la prueba de hipótesis deberá arrojar el siguiente resultado:

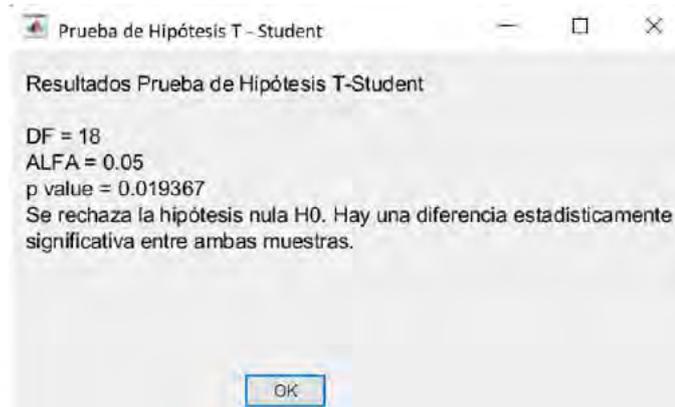


Figura 26. Resultados Prueba T – Student sobre los datos de DBO5.

Existe una discusión acerca de las asunciones hechas para realizar este tipo de prueba en estadística. Deberá referirse a la tesis para indagar más al respecto.

La prueba de estadística T-Student de dos muestras comparada dos medias de dos muestras. Así, las hipótesis se han formulado de la siguiente forma:

La hipótesis nula corresponde a una reducción al absurdo. Deseamos evaluar si hay una diferencia estadísticamente significativa entre las dos muestras (la igualdad o superposición entre los datos medidos no se debe simplemente a un hecho aleatorio o fortuito). Luego se tiene:

**$H_0$ :** *No hay diferencia estadísticamente significativa entre las muestras (no se tiene suficientes pruebas para afirmar ello).*

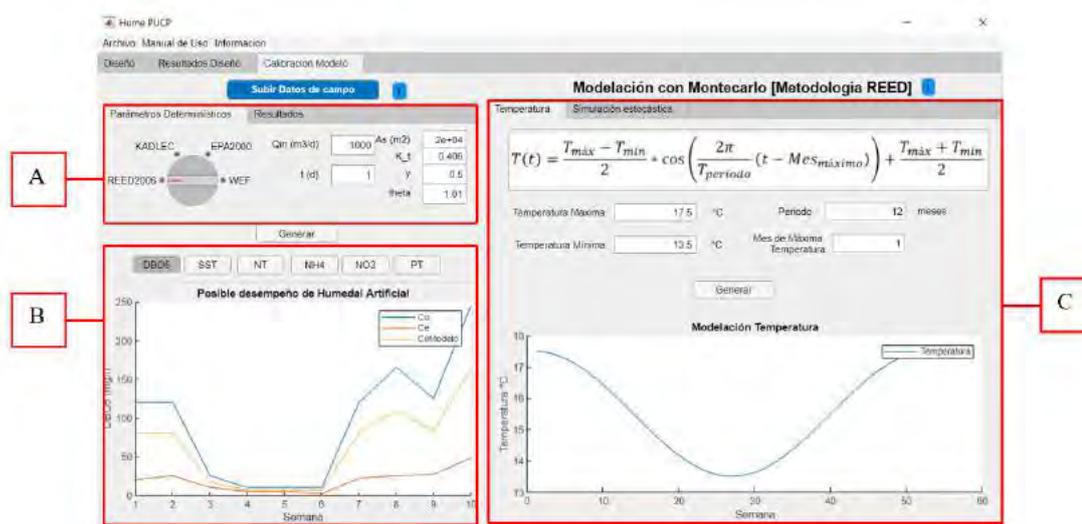
**$H_1$ :** *Hay una diferencia estadísticamente significativa entre ambas muestras.*

En este caso, el valor de  $p$  ( $p$ -value) menor a 0.05 indica que se rechaza la hipótesis  $H_0$  (nula) y se toma la hipótesis alternativa. En este caso, un valor de  $p > 0.05$  implaría que ambas curvas si están superpuestas. Este resultado refuerza las asunciones y datos colocados en el aplicativo.

### 1.4.3 Análisis Estocástico para el seguimiento de un humedal artificial

Siguiendo la líneas anteriores es importante resaltar que un valor mayor de 0.05 de p no implica que ambas curvas sean iguales. La hipótesis nula indica que no hay suficientes pruebas para afirmar que ambas curvas sean distintas. En estas líneas, a pesar de haber hecho seguimiento riguroso a estas constantes de diseño el no poder incorporar la incertidumbre de la naturaleza de un aplicativo lo lleva a implementar la última herramienta asociada a este aplicativo.

Si observamos la Figura 23, apartado C aquí finalmente podemos volver a modelar nuestro aplicativo reduciendo una variable que aporta incertidumbre a nuestro modelo, que es la temperatura.



Anteriormente, la temperatura era un valor estático en el modelo. Ahora, con la simulación en C podemos incorporar esta variable a través del modelamiento de este para una región en particular.

Como se observa, el modelo de temperatura sigue una ecuación sinusoidal. Los parámetros que definen son la temperatura máxima, temperatura mínima y el mes (1-12) donde ocurre la temperatura máxima. Así, para todo el todo el año (53 semanas aproximadamente), se ha modelado la temperatura que se muestra en el gráfico de C. El usuario puede referirse a alguna fuente confiable donde tenga record histórico anual de las temperaturas promedio a lo largo del año para completar dicho modelamiento. A continuación, se muestran las ecuaciones empleadas y las asunciones hechas para lograr esta simulación:

### 1.4.3.1 Modelo Temperatura

$$Temp(t) = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \cos\left(2\pi \frac{(-t + MaxValue)}{Nsemanas = 52}\right) + \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

Se modela la temperatura para un año (o 52 semanas aproximadamente). El modelo sigue una ecuación sinusoidal ya sea cose no seno. Luego, la amplitud estará definida por las temperaturas máximas y mínimas de la zona. Luego, el resultado es:

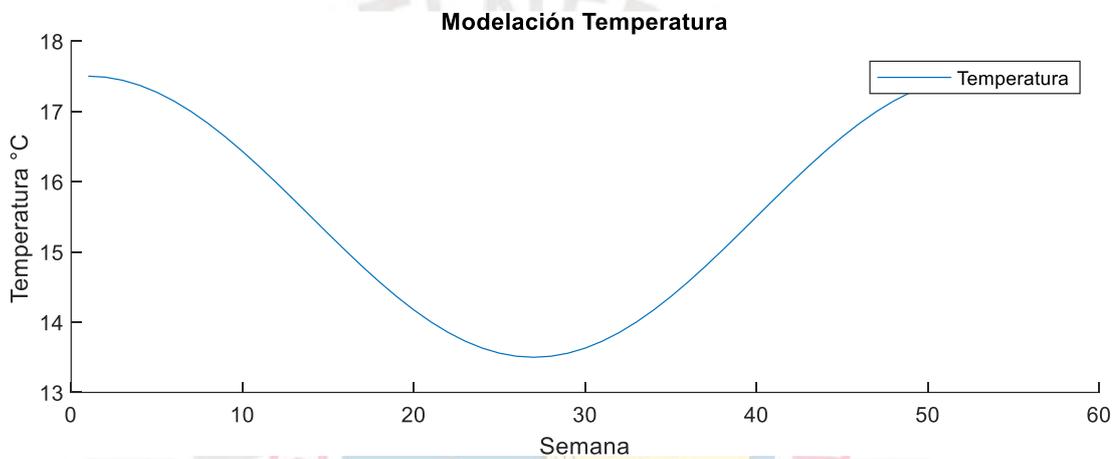


Figura 27. Modelo de Temperatura (Max: 17.5 °C; Min: 13.5°C)

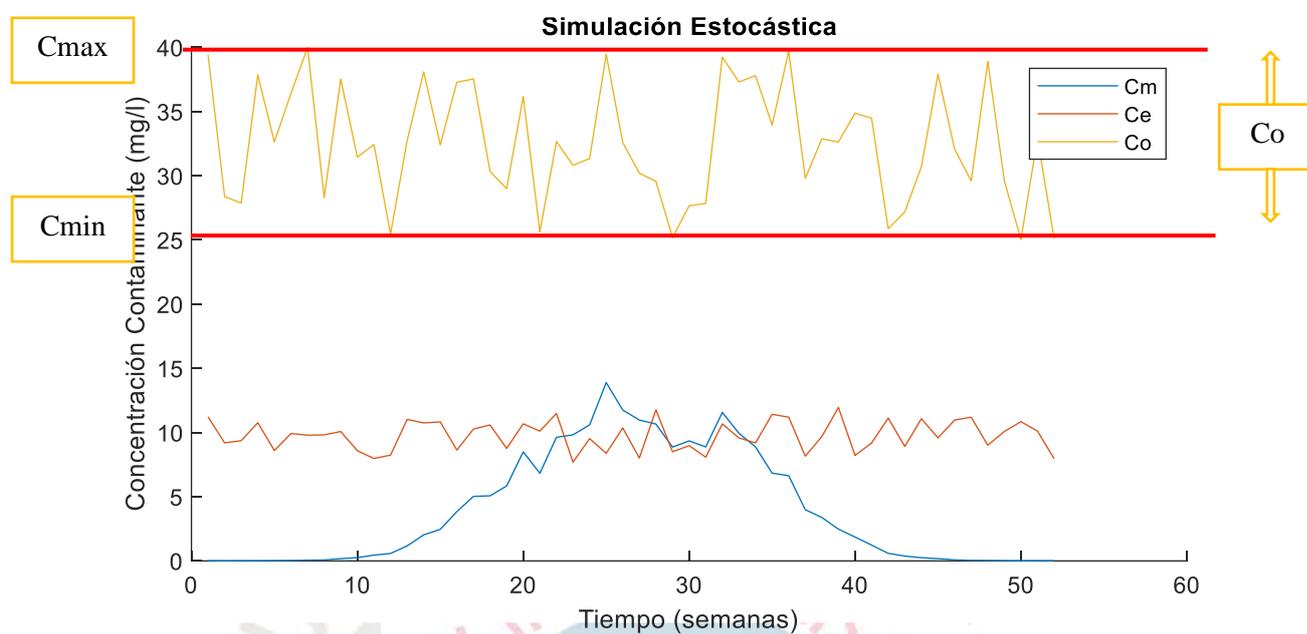


Figura 28. Simulación de concentraciones de salida “exagerada” para 52 semanas  $\approx$  1 año.

La **Error! Reference source not found.** Figura 28 muestra una simulación con condiciones irreales para estudiar el comportamiento del modelo. Se observa la drástica influencia de la temperatura en el modelo (curva Cm). Como se observa en la ecuación  $C_m(t)$  depende de  $K(t)$  la cual depende de  $Temp(t)$ . El modelo se logró con una temperatura que oscila entre 0 y 50 °C. A continuación, se muestra la misma captura de pantalla pero para una simulación de 3 años y una temperatura máxima de 20 °C y 10°C.

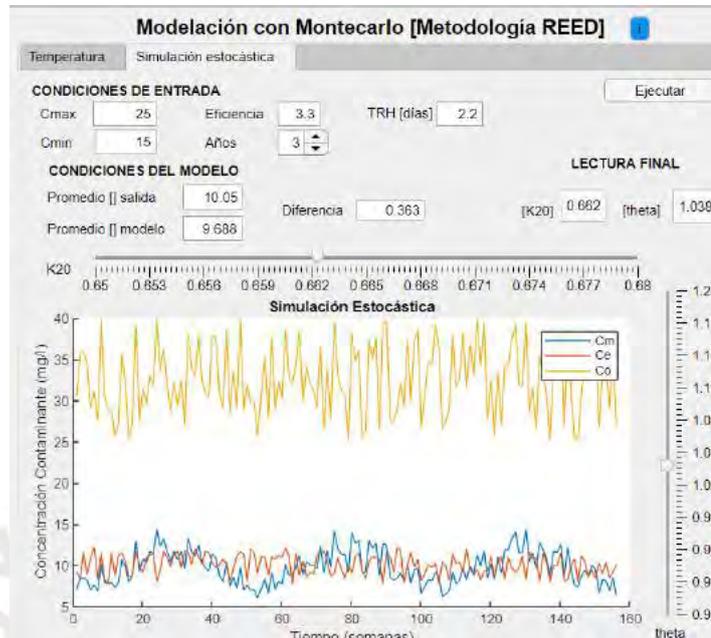


Figura 29. Simulación para 3 años.

Se observa en la Figura 29 la simulación y los parámetros que se obtuvieron. Si bien existe una diferencia de 0.363 entre las curvas de salida, la aproximación es buena. Asimismo, el tiempo de simulación es el mínimo gracias a las robustas herramientas tecnológicas con las que cuenta MATLAB. A continuación, se muestran las ecuaciones empleadas.

$$C_o(t = 1:T) = C_{max} + rand() * C_{min};$$

$$C_e(t) = (C_{max} + rand() * C_{min}) / E_{factor};$$

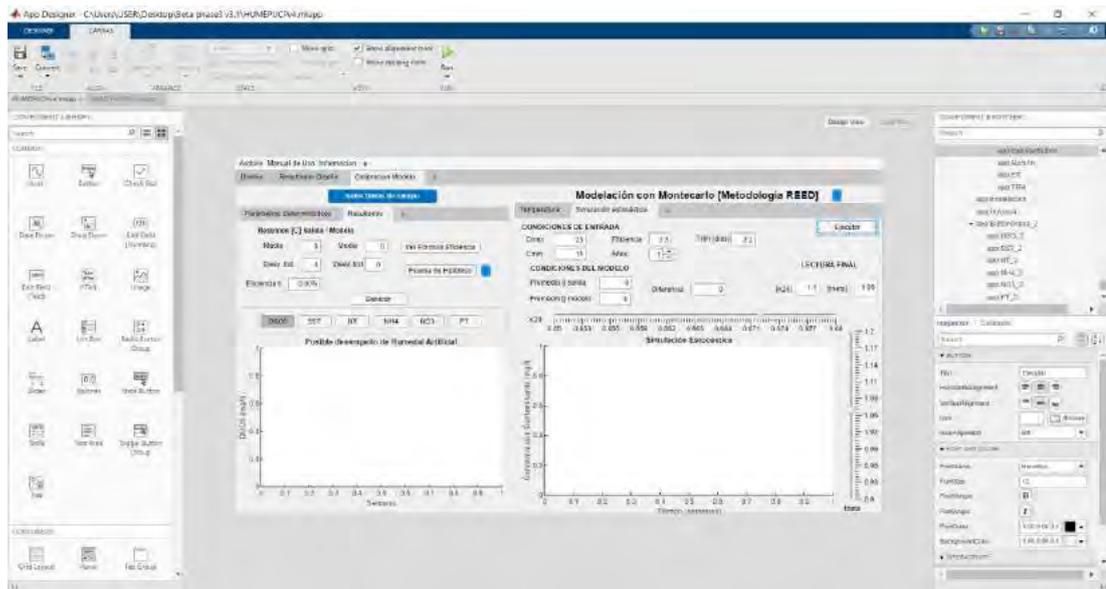
$$K(t) = K20i * \theta_i^{Temp(t)-20};$$

$$C_m(t) = C_o(t) e^{-TRH * K(t)};$$

Finalmente, se invita al usuario a interactuar con ambas herramientas; desde un enfoque estadístico con modelos reales y un enfoque estocástico con la simulación de estos sistemas. Idealmente, las constantes de diseño las cuáles gobiernan estos modelos tomaran una forma más asertiva permitiendo proyectar a los humedales de forma más eficientemente.

## 2. ANEXO 2: MANUAL DE USO DEL APLICATIVO HUMEPUCP – GUIA DEL PROGRAMADOR

### 2.1 ESTRUCTURA DEL CÓDIGO EMPLEADO



Los principales componentes en el aplicativo son las siguientes herramientas:

- Axis
- Botones
- Edit Fields
- Tab groups
- Slide bars
- Knobs, etc.

Luego, un aplicativo en MATLAB tiene Callbacks, Functions y Properties los cuales le dan origen a la interacción entre botones y demás herramientas. Como cualquier programa, se leen los valores de los componentes, se asignan en variables públicas o privadas y se ejecutan ciertas operaciones.

El aplicativo, además, interactúa con SIMULINK, el cual es otra herramienta con la cual cuenta MATLAB. Para ello, es importante mencionar cómo esta relación es llevada cabo.

### 2.1.1 Workspace

El Workspace en la aplicación central sirve como centro de procesamiento y almacenamiento de variables. MATLAB nos dice cómo las variables se están almacenando y cómo el programa las entiende. Es posible trabajar con variables dentro de APPDESIGNER sin mandarlas al workspace, sin embargo, esto puede dar origen a errores comunes ya que no estaremos trabajando sin saber cómo MATLAB almacena sus datos. As

En operaciones extensas es recomendable observar dicho almacenamiento. El comando es el siguiente:

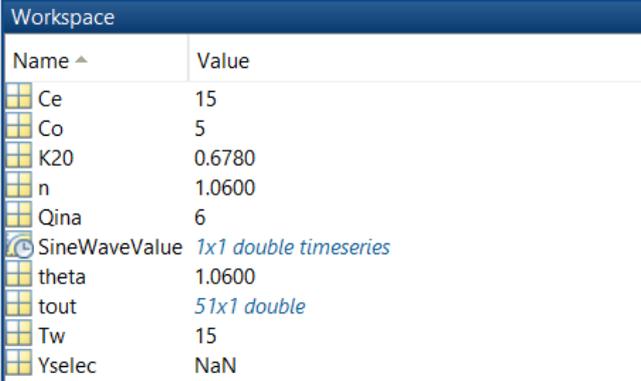
```
function CalcularButton_3Pushed(app, event)
    %Asignamos primero Tw, theta, K20, n, Co y Ce respectivamente
    assignin('base','Ce',str2double(app.CeDropDown.Value));
    assignin('base','Co',app.CoSlider.Value);
    assignin('base','Qina',app.QinaEditField.Value);
    assignin('base','Tw',app.TwEditField.Value);
    assignin('base','n',str2double(app.nEditField_2.Value));
    assignin('base','K20',str2double(app.K20EditField_16.Value));
    assignin('base','theta',str2double(app.thetaEditField.Value));

    %Valor puntual
    assignin('base','Yselec',str2double(app.Yselec.Value));
    r=app.Yselec.Value;

    %Simulamos el modelo en Simulink con la función:
    simout=sim('As','StopTime',num2str(app.YmaximoSlider.Value));
```

La parte del diseño asigna extensamente variables ya que, como se mencionó, permiten a SIMULINK tomar dichos valores. Ver la documentación del comando **assignin** para mayor detalle. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/assignin.html>

Una vez asignadas correctamente las variables, dentro de la página principal de MATLAB se tendrá:



Name ^	Value
Ce	15
Co	5
K20	0.6780
n	1.0600
Qina	6
SineWaveValue	1x1 double timeseries
theta	1.0600
tout	51x1 double
Tw	15
Yselec	NaN

Figura 30. Workspace - Diseño de un Humedal Artificial

Luego, para simular los datos en SIMULINK se emplea el comando:

```

case 'KADLEC'

→ simout=sim('KADLEC_SIMULINK','StopTime',num2str(2));
plot(app.UIAxes_3,simout.Asf.Time, simout.Asf.Data);
legend(app.UIAxes_3,'Modelo KADLEC');
if app.DB05Button.Value==1
    Kconvert=str2double(app.K20DB0.Value);
    if Kconvert<1
        msgbox('Actualice las constantes de diseño')
    end
end

```

Figura 31. Part del código HumePUCP – Comando simout

Simulink busca el archivo 'KADLED\_SIMULINK' y ejecuta la simulación hasta un tiempo 'StopTime'. El tiempo preconfigurado de este sistema es de 2 segundos. En particular se ha colocado el número 2 como un símil de 2 m ya que este valor corresponde a la profundidad de diseño del humedal. El resultado corresponde:

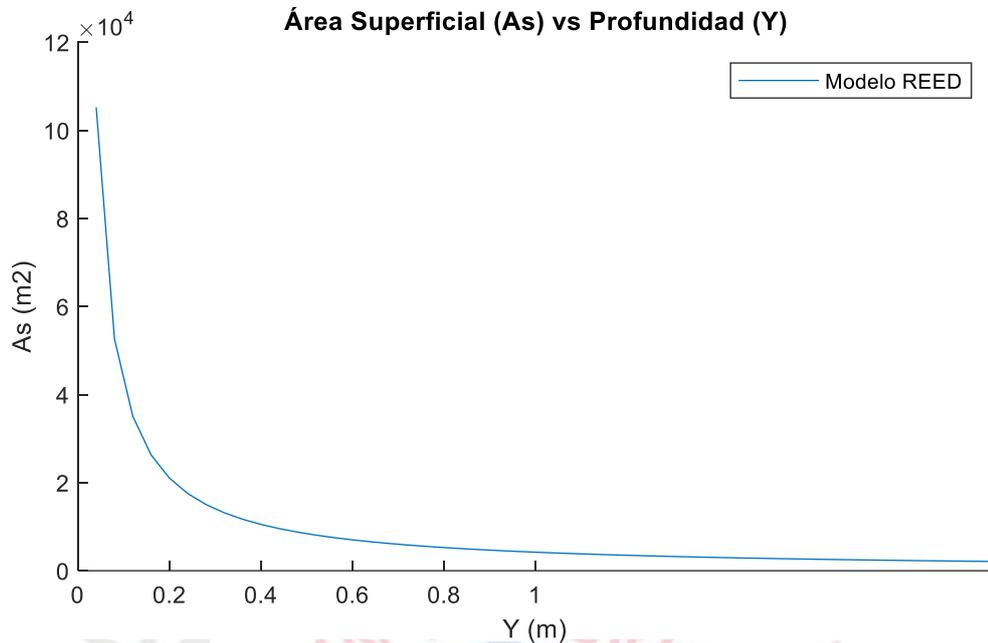
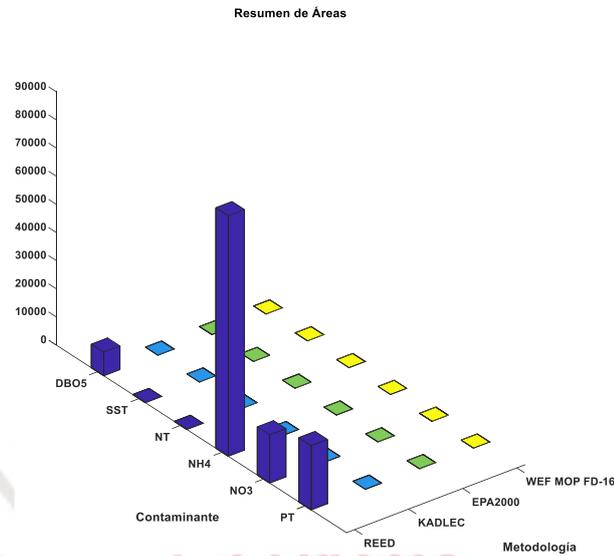


Figura 32. Resultado de la simulación Reed2006 para el contaminante DBO<sub>5</sub>.

Se ha decidido mostrar los ejes hasta 1m ya que teóricamente los humedales no debería exceder dicho valor, más allá de 1 metro los humedales no funcionan ya que la extensión de las raíces no es así. Sin embargo, para efectos visuales la simulación alcanzan los 2 m como ya se explicó anteriormente. De igual forma, el gráfico permite interactuar y hacer lectura de los distintos puntos. El comando para la lectura de puntos es `get` (<https://www.mathworks.com/help/control/ref/get.html>).

### 2.1.2 Empleo 3D de Perillas – Knobs

El presente trabajo no hubiera sido posible sin la concepción en una matriz de 3 dimensiones de los conceptos involucrados. Los componentes vienen a ser METODOLOGÍAS:CONTAMINANTE:ÁREA SUPERFICIAL. MATLAB por su naturaleza fácilmente permite este arreglo. A continuación se muestra el producto de esta interacción que viene a ser un gráfico en 3D justamente.



**Figura 33. Simulación solo para REED2006.**

Las perillas o Knobs siguen sencillos casos de “switch”, es decir valores booleanos de verdadero o falso (0 o 1). A continuación se muestra un pedazo de código evaluando los Knobs:

```
switch app.Knob.Value
case 'REED2006'
simout=sim('REED2006_SIMULINK_AUX','StopTime',num2str(2));
plot(app.UIAxes_3,simout.Asf.Time, simout.Asf.Data);
legend(app.UIAxes_3,'Modelo REED');

if app.DBO5Button.Value==1
app.Yshow1.Value=app.Yselec.Value;
app.As1show.Value=simout.Asp;
app.ASM1C1=app.As1show.Value;
elseif app.NH4Button.Value==1
app.Yshow4.Value=app.Yselec.Value;
app.As4show.Value=simout.Asp;
app.ASM1C4=app.As4show.Value;

elseif app.NO3Button.Value==1
app.Yshow5.Value=app.Yselec.Value;
app.As5show.Value=simout.Asp;
app.ASM1C5=app.As5show.Value;
else
app.Yshow6.Value=app.Yselec.Value;
app.As6show.Value=simout.Asp;
app.ASM1C6=app.As6show.Value;
end
x=[1,2,3,4,5,6];
y=[app.As1show.Value,0,0,app.As4show.Value,app.As5show.Value,app.As6show.Value];
bar(app.UIAxes2,x,y);
```

**Figura 34. Empleo de Knobs con switch y if-statements**

### 2.1.3 Properties

El aplicativo declara propiedades como variables puntuales para emplearlas indistintamente a lo largo de aplicativo. Para invocarlas solo basta con escribir “*app.*” antes del nombre la variable. Al generar nosotros varios valores de área superficial. Estos se guardan en estas propiedades definidas como “privadas” y se emplean más adelante con el segundo botón para generar la gráfica 3D:

```
properties (Access = private)
%Generar INFORME
usersValueArray
settingsDialog

%Valores Matriz 3D
ASM1C1=0
ASM1C4=0
ASM1C5=0
ASM1C6=0
ASM2C1=0
ASM2C2=0
ASM2C3=0
ASM2C4=0
ASM2C5=0
ASM2C6=0
ASM3C1=0
ASM4C3=0
ASM4C4=0

%Modelo Temperatura
yF
```

Figura 35. Propiedades del aplicativo Hume PUCP

## 2.1.4 Generación de un reporte PDF

La generación de un reporte sigue los conceptos de ‘handles’ y ‘parent’ ya que estaremos llamando a otra función para almacenar otras variables pero a la vez estamos desplegando variables dentro de esta segundo función ().

The screenshot shows a window titled "DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO" with the following fields and values:

- Resumen: *Ingrese un breve resumen de su proyecto.*
- Nombre del Proyecto:
- Tipo: Flujo Superficial
- Encargados:
- Metodología:
- Ubicación:
- Caudal de Diseño:
- Departamento:
- Contaminante a priorizar:
- Fecha:
- Area Superficial: 0
- Manning: 0.65
- K20: 0
- Temperatura: 15
- $\theta$ : 0
- Profundidad Final (m): 0.5

Red arrows point from a box labeled "Variables recogidas de HumePUCP" to the Manning, Temperatura, and Profundidad Final (m) fields.

Figura 36. Alcance de variables desde HumePUCP hasta Descripción.mlapp

Con un mínimos conceptos de programación orientada a objetos (OOP) tomamos los valores que deseamos pasar a la función ‘child’ o hija y las almacenamos en un array denominado UsersValueArray.

```
function GenerarPDFPushed(app, event)
app.usersValueArray = {app.Manning.Value,app.Yselec.Value,app.TempAvg.Value};
app.settingsDialog = DescripciónPDFv4; % Llamar a la Descripción.mlapp
app.settingsDialog.initfcn(app.usersValueArray,app.HumePUCP) % Enviar data desde HUMEPUCP a DescripciónPDF
```

```

properties (Access = public)
    userData % Data para emplear afuera
end

properties (Access = private)
    parentFigureHandle
end

methods (Access = public)
    %Esta funcion asigna los valores enviados desde HumePUCP
    function initfcn(app,defaultValues,handle2parentfigure)
        app.parentFigureHandle = handle2parentfigure;
        app.userData = defaultValues;
        %Asignar valores de default
        app.Manning.Value = num2str(defaultValues{1});
        app.ProfundidadFinal.Value = num2str(defaultValues{2});
        app.Temperatura.Value = num2str(defaultValues{3});
    end
end
end

```

**Figura 37. Propiedades de la segunda aplicación para la obtención de data desde HumePUCP**

Dentro de App.Descripcion se emplea una función como parte de los métodos de este. La función se pudo definir afuera de MATLAB como otro script y anexarlo a la aplicación pero como el usuario igualmente interactúa con esta segunda aplicación fue prudente incluirla en los métodos de este.

Luego, se observa que la función **initfcn** toma los comandos (app,defaultValues y handl2parentfigure). El primero corresponde a los valores que hemos almacenado anteriormente en HumePUCP y el segundo corresponde a la aplicación a la cuál asignamos “*inheritance*”.

Finalmente, se utilizan comandos de **ACTIVEX** para crear, editar y guardar archivos automáticamente de Microsoft como en este caso es Word. Si bien MATLAB tiene un comando para generar reporte de este tipo, este corresponde a una extensión de la licencia. Hasta la fecha que se escribió este aplicativo este tenía costo adicional, motivo por el cual se incursionó en emplear comando “primitivos” como ACTIVEX. En el **ANEXO 3** puede visualizar el código completo. La idea básica fue emplear un comando de iteración **for** y buscar por valores pre alocados en la plantilla de Word anteriormente cargada.

```
find_txt={0};  
replace_txt={0};  
for i=1:numel(ListaValoresOrg)  
    find_txt{i}=ListaValoresOrg{i};  
    replace_txt{i} = ListaValoresDest{i};  
    actx_word.Selection.Find.Execute(find_txt{i},1,0,0,0,0,1,0,1,replace_txt{i},2,0,0,0,0);  
end
```

**Figura 38. Empleo de ActiveX y Find Values para generar el reporte PDF**

Luego, como se observa, se genera un array de valores de origen y valores de correspondencia con los cuales reemplazar y presentar el nuevo documento PDF. A continuación se muestra la plantilla empleada para la búsqueda de valores de origen. Estos están en mayúsculas y tienen una terminación FT.





## Ficha Técnica - HUMEPUCP

### DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Resumen: RESUMENFT

Nombre del Proyecto:	NOMBREPROYECTOFT	Tipo:	Humedal Artificial de Flujo Superficial
Encargados:	NOMBREFT	País:	Perú
Ubicación:	UBICACIONFT	Fecha:	FECHAFT
Departamento:	DPTOFT		

### DETALLES TÉCNICOS

Modelo:	METODOLOGIAFT	Rugosidad de Manning (n):	MANNINGFT
Área Superficial (As):	AREAFT	Contaminante de mayor relevancia:	RELEVANCIAFT
Profundidad de diseño:	PROFUNDIDADFT		
Caudal de ingreso:	CAUDALFT		

### CONSTANTES DE DISEÑO

K <sub>20</sub> :	K20FT
Θ:	THETAFT
Temperatura Promedio (°C):	TEMPERATURAFT

Figura 39. Plantilla para la generación de un reporte en PDF

## 2.2 LECCIONES APRENDIDAS: OPTIMIZACIÓN Y LIMPIEZA DE CÓDIGO

### 2.2.1 Trabajo Cells, Arrays y Matrices

Particularmente MATLAB puede llegar generar varios inconvenientes si no se tiene una plena comprensión del almacenamiento de variables, sus propiedades y sobre todo descripción explícita de los mismos, ejemplo uso de (),[],{ },etc. En particular el uso de celdas una herramienta excelente de lectura y manejo de tablas. Sin embargo, al ser muy versátil puede llegar a arrojar valores incoherentes. El principio conocido como GIGO se aplica. (Garbage In, Gargabe Out). En la medida que las celdas pueden almacenar cualquier valor, más adelante estos se mostrarán y reducirán la productividad del desarrollo de los aplicativos.

Asimismo, MATLAB tiene un gran potencial para el trabajo con matrices. De ahí que proviene su nombre (Matrix Laboratory). Por ello, al querer optimizar se debería de optar por aquellas herramientas que emplean el cálculo de matrices en vez de superposición de celdas o arrays. Un ejemplo de esta optimización fue al emplear el comando **xlsread** para la lectura de una hoja de Excel. Si bien los valores de lectura corresponden a una matriz, el tiempo de ejecución no es eficiente. Este se manifiesta evidentemente cuando se implementan aplicativos relativamente extensos como lo s HumePUCP. De igual forma, MATLAB actualmente sugiere a sus usuarios evitar usar dicho comando:

 **xlsread is not recommended. Use readtable, readmatrix, or readcell instead. For more information, see Compatibility Considerations.**

**Figura 40.** Uso del comando **xlsread** y **readcell** («(Not recommended) Read Microsoft Excel spreadsheet file - MATLAB xlsread», s. f.)

Al parecer, el comando **xlsread** emplea otro enfoque más rustico para la obtención de la data en una hoja de Excel en comparación a sus semejantes como lo es **readtable**, **read matrix** etc; los cuales convierten en archivo en una versión simplificada y almacena con esa versión similar a un “.txt” los datos. A continuación se muestra un ejemplo del empleo de **readtable** («Create table from file - MATLAB readtable», s. f.) y el workspace empleado:



```

16
17 - Hojas_CM=size(sheetnames('Data11Prueba.xlsx'),1);
18 - DataSet=cell(1,Hojas_CM);
19 - for i=1:Hojas_CM
20 -     DataSet{1,i}=readcell('Data11Prueba.xlsx','Sheet',i,'Range',12);
21 - end
22 - Kt=1;
23 - t=2;
24 - data_DBO=cell2mat(DataSet{1});
25 - data_SST=cell2mat(DataSet{1});
26 - data_NT=cell2mat(DataSet{1});
27 - data_PT=cell2mat(DataSet{4});
28 - data_NO3=cell2mat(DataSet{5});
29 - data_NH4=cell2mat(DataSet{6});

```

Command Window

```

DataSet =
1x6 cell array

    [9x4 cell]    [10x4 cell]    [14x4 cell]    [10x4 cell]    [10x4 cell]    [10x4 cell]

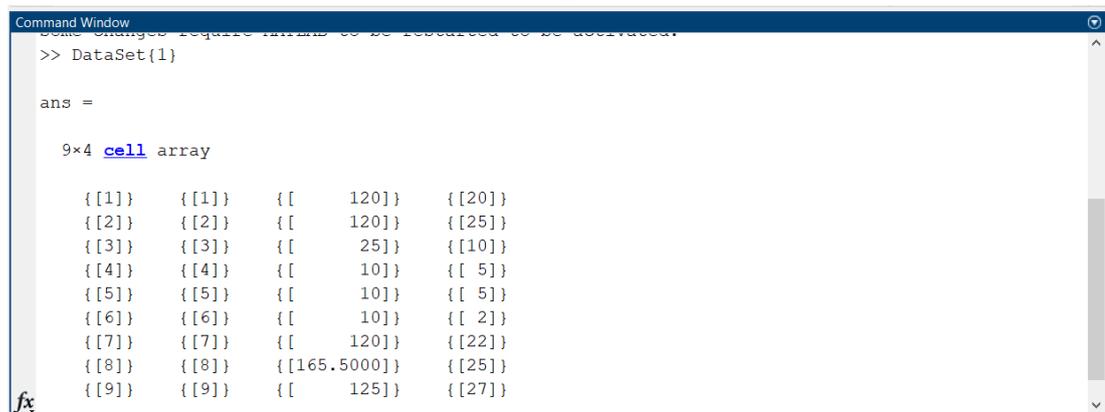
>> schemer_import
Imported color scheme WITHOUT boolean options from
C:\Users\USER\Documents\MATLAB\scottclowe-matlab-schemer-2156bb9\schemes\default.prf
Some changes require MATLAB to be restarted to be activated.
fx >>

```

Name	Value
Cm_SST	182.3459;82.3450;18.7438;8.70
Cp_SST	[24.2000;24.3000;9.1000;6.700
data_DBO	9x4 double
data_NH4	10x4 double
data_NO3	10x4 double
data_NT	9x4 double
data_PT	10x4 double
data_SST	9x4 double
DataSet	1x6 cell
Hojas_CM	6
t	6
Kt	1
I	2

**Figura 41.** Aplicación del comando **readcell** a una hoja de Excel

En primer lugar, se asignan a DataSet las celdas con los valores (cualquier tipo de valor entre texto, números, números reconocidos como texto) y se almacenan en DataSet. Luego se debe aplicar una conversión de las celdas empleadas y si se cumplen los requisitos del comando **cell2mat** («Convert cell array to ordinary array of the underlying data type - MATLAB cell2mat», s. f.) estos serán convertidos en números para su posterior uso. A continuación se muestra una captura de los valores originales registrados en DataSet{1}:



```

Command Window
Some changes require rights to be restored to be activated.
>> DataSet{1}

ans =

    9×4 cell array

    {[1]}    {[1]}    {[ 120]}    {[20]}
    {[2]}    {[2]}    {[ 120]}    {[25]}
    {[3]}    {[3]}    {[ 25]}    {[10]}
    {[4]}    {[4]}    {[ 10]}    {[ 5]}
    {[5]}    {[5]}    {[ 10]}    {[ 5]}
    {[6]}    {[6]}    {[ 10]}    {[ 2]}
    {[7]}    {[7]}    {[ 120]}    {[22]}
    {[8]}    {[8]}    {[165.5000]}    {[25]}
    {[9]}    {[9]}    {[ 125]}    {[27]}
  
```

**Figura 42. Obtención de una celda de la lectura hecha por DataSet.**

Finalmente, se resalta tomar en cuenta estas consideraciones al emplear estos comandos. Asimismo, una vez que se tienen una matriz es más eficiente aplicar el cálculo entre matrices que una iteración de valor a valor. Esto, de hecho, es una de las ventajas que se debería buscar usar cuando se trabaja con MATLAB.

## 2.3 MEJORANDO EL PROGRAMA: HACIA UN APPLICATIVO PERFECCIONADO

Los principales aspectos que pueden repotenciarse dentro del aplicativo se extienden a varios aspectos así como la actual tesis lo hace; desde enfoque como herramienta de simulación (SIMULINK), estadístico (Pruebas de Hipótesis), estocástico y prácticos (generación de reportes).

### 2.3.1 Enfoque Estadístico

Este aspecto se ha discutido extensamente en la Tesis. Principalmente se resalta que el aplicativo solo ejecuta una prueba de hipótesis muy limitada a los valores de DBO5. Esto debido a la naturaleza de los datos con los que se están trabajado. Para ello, idealmente el

aplicativo tiene el potencial de expandir sus alcances y ejecutar como corresponde pruebas estadísticas. Asimismo, un mayor alcance puede llevar a trabajo de humedales tomar otras formas como limpieza de aguas en general. Dependerá del enfoque al cuál se planea impulsar el proyecto. Si bien existen herramientas netamente en estadística, el paquete de estadística está incorporado en MATLAB lo cual representa una mayor ventaja a otro software comercial como SPSS Statistics o R por ejemplo.

### **2.3.2 Enfoque Estocástico**

Las ecuaciones presentadas en este documento son un primer enfoque en este campo de la simulación estocástica. Existe en la literatura una aplicación más robusta y extensa de estos sistemas como lo es en sistemas mecánicos, vibraciones y resonancia mecánica. Tras una revisión más técnica y con la formalidad matemática que corresponde igualmente se puede proyectar el diseño de humedales desde otro enfoque. Si bien la rigurosidad aplicada puede ser extensa y ambiciosa no deja de perder valor. Como las herramientas que se desarrollan en matemática pura para resolver problemas aparentemente con poca aplicación como la teoría de números, el trabajo y los métodos empleados son el producto valioso el cual con el adecuado enfoque se pueden trasladar a aplicaciones reales y de mucha pertinencia.

### **2.3.3 Uso compartido y la teoría de juegos**

Como el clásico ejemplo de dos hombres en la cárcel y la teoría de juegos, el presente trabajo recoge su potencial cuando es empleado por no una, sino varias comunidades cuyos encargados puedan compartir los datos adquiridos. Esta idea se proyecta con más claridad en el artículo *Tesis PUCP: Diseño de un software en MATLAB para la optimización del diseño de humedales artificiales* de la revista CIV. Idealmente, a través de la cooperación los individuos involucrados en un determinado escenario percibirán finalmente mayor beneficio.

## **3. ANEXO 3: CÓDIGO EMPLEADO APPDESIGNER – MATLAB**

### **1.1. PROPIEDADES GENERALES**

```

classdef HUMEPUCPv4_exported < matlab.apps.AppBase

    % Properties that correspond to app components
    properties (Access = public)
        HumePUCP                matlab.ui.Figure
        ArchivoMenu              matlab.ui.container.Menu
        CerrarMenu               matlab.ui.container.Menu
        ManualdeUsoMenu          matlab.ui.container.Menu
        GuadeusoMenu             matlab.ui.container.Menu
        ProyencampoMenu          matlab.ui.container.Menu
        InformacionMenu          matlab.ui.container.Menu
        EstndaresNacionalesdeCalidadAmbientalparaAguaMenu
matlab.ui.container.Menu
        DeldesarrolladorMenu     matlab.ui.container.Menu
        Documentacion            matlab.ui.container.Menu
        TabGroup                  matlab.ui.container.TabGroup
        DiseoTab                  matlab.ui.container.Tab
        CondicionesdeEntradaPanel matlab.ui.container.Panel
        m3daLabel                 matlab.ui.control.Label
        CLabel                     matlab.ui.control.Label
        Label_4                    matlab.ui.control.Label
        QinEditField_3Label       matlab.ui.control.Label
        Qin                        matlab.ui.control.NumericEditField
        TwEditFieldLabel          matlab.ui.control.Label
        TempAvg                    matlab.ui.control.NumericEditField
        Label_8                    matlab.ui.control.Label
        NLabel                      matlab.ui.control.Label
        NTanques                   matlab.ui.control.EditField
        nEditFieldLabel           matlab.ui.control.Label
        Manning                     matlab.ui.control.NumericEditField
        CondicionesdeDiseoLabel   matlab.ui.control.Label
        CondicionesdeSalidaPanel  matlab.ui.container.Panel
        mgLLabel                    matlab.ui.control.Label
        mgLLabel_2                  matlab.ui.control.Label
        mgLLabel_3                  matlab.ui.control.Label
        mgLLabel_4                  matlab.ui.control.Label
        DB05Label_4                 matlab.ui.control.Label
        DB05DropDown                matlab.ui.control.DropDown
        PTDropDownLabel             matlab.ui.control.Label
        PTDropDown                  matlab.ui.control.DropDown
        NTDropDownLabel            matlab.ui.control.Label
        NTDropDown                  matlab.ui.control.DropDown
        SSTDropDownLabel           matlab.ui.control.Label
        SSTDropDown                  matlab.ui.control.DropDown
        NH4DropDownLabel           matlab.ui.control.Label
        NH4DropDown                  matlab.ui.control.DropDown
        NO3DropDown_2Label         matlab.ui.control.Label
        NO3DropDown                  matlab.ui.control.DropDown
        mgLLabel_5                  matlab.ui.control.Label
        mgLLabel_6                  matlab.ui.control.Label
        Label_7                      matlab.ui.control.Label
        TabGroup4                    matlab.ui.container.TabGroup
        Graficos                      matlab.ui.container.Tab
        ButtonGroup                  matlab.ui.container.ButtonGroup
        DB05Button                   matlab.ui.control.ToggleButton
        SSTButton                     matlab.ui.control.ToggleButton
        NTButton                       matlab.ui.control.ToggleButton
        NH4Button                     matlab.ui.control.ToggleButton
        NO3Button                     matlab.ui.control.ToggleButton
        PTButton                       matlab.ui.control.ToggleButton
        UIAxes_3                      matlab.ui.control.UIAxes
        SeleccioneYfinalmLabel       matlab.ui.control.Label
        Yselec                        matlab.ui.control.NumericEditField
    end
end

```

CoSliderLabel	matlab.ui.control.Label
CoSlider	matlab.ui.control.Slider
ResumenAsTab	matlab.ui.container.Tab
UIAxes2	matlab.ui.control.UIAxes
DBO5Label	matlab.ui.control.Label
YmLabel	matlab.ui.control.Label
Yshow1	matlab.ui.control.NumericEditField
Asm2Label	matlab.ui.control.Label
As1show	matlab.ui.control.NumericEditField
YmEditField_2Label	matlab.ui.control.Label
Yshow2	matlab.ui.control.NumericEditField
Asm2EditField_2Label	matlab.ui.control.Label
As2show	matlab.ui.control.NumericEditField
YmEditField_3Label	matlab.ui.control.Label
Yshow3	matlab.ui.control.NumericEditField
Asm2EditField_3Label	matlab.ui.control.Label
As3show	matlab.ui.control.NumericEditField
NH4Label_2	matlab.ui.control.Label
YmEditField_4Label	matlab.ui.control.Label
Yshow4	matlab.ui.control.NumericEditField
Asm2EditField_4Label	matlab.ui.control.Label
As4show	matlab.ui.control.NumericEditField
NO3Label_2	matlab.ui.control.Label
YmEditField_5Label	matlab.ui.control.Label
Yshow5	matlab.ui.control.NumericEditField
Asm2EditField_8Label	matlab.ui.control.Label
As5show	matlab.ui.control.NumericEditField
PTLabel_2	matlab.ui.control.Label
YmEditField_6Label	matlab.ui.control.Label
Yshow6	matlab.ui.control.NumericEditField
Asm2EditField_8Label_2	matlab.ui.control.Label
As6show	matlab.ui.control.NumericEditField
SSTLabel_3	matlab.ui.control.Label
NLabel_2	matlab.ui.control.Label
VerModeloSimulinkButton	matlab.ui.control.Button
CalcularButton	matlab.ui.control.Button
Knob	matlab.ui.control.DiscreteKnob
ConstantesdeDiseoPanel	matlab.ui.container.Panel
TeoriaEcuacionesButton	matlab.ui.control.Button
TabladeConstantesButton	matlab.ui.control.Button
K20EditField_18Label	matlab.ui.control.Label
K20DBO	matlab.ui.control.EditField
EditField_20Label	matlab.ui.control.Label
thetaDBO	matlab.ui.control.EditField
CLabel_2	matlab.ui.control.Label
cDBO	matlab.ui.control.EditField
DBO5Label_5	matlab.ui.control.Label
SSTLabel_2	matlab.ui.control.Label
NLabel	matlab.ui.control.Label
NH4Label	matlab.ui.control.Label
K20SST	matlab.ui.control.EditField
K20NT	matlab.ui.control.EditField
K20NH4	matlab.ui.control.EditField
thetaSST	matlab.ui.control.EditField
thetaNT	matlab.ui.control.EditField
thetaNH4	matlab.ui.control.EditField
cSST	matlab.ui.control.EditField
cNT	matlab.ui.control.EditField
cNH4	matlab.ui.control.EditField
K20NO3	matlab.ui.control.EditField
thetaNO3	matlab.ui.control.EditField
cNO3	matlab.ui.control.EditField

K20PT	matlab.ui.control.EditField
thetaPT	matlab.ui.control.EditField
cPT	matlab.ui.control.EditField
NO3Label	matlab.ui.control.Label
PTLabel	matlab.ui.control.Label
GenerarPDF	matlab.ui.control.Button
GenerarReporteLabel	matlab.ui.control.Label
ResultadosDiseoTab	matlab.ui.container.Tab
Asm2EditField_5Label	matlab.ui.control.Label
MinAsReed	matlab.ui.control.NumericEditField
KADLECYKNIGHTLabel	matlab.ui.control.Label
EPA2000Label	matlab.ui.control.Label
REED2006Label	matlab.ui.control.Label
Asm2EditField_6Label	matlab.ui.control.Label
MinAsEPA	matlab.ui.control.NumericEditField
Asm2EditField_7Label	matlab.ui.control.Label
MinAsKadlec	matlab.ui.control.NumericEditField
UIAxes9	matlab.ui.control.UIAxes
ContaminanteEditField_4Label	matlab.ui.control.Label
ContReed	matlab.ui.control.EditField
ContaminanteEditField_5Label	matlab.ui.control.Label
ContEPA	matlab.ui.control.EditField
ContaminanteEditField_6Label	matlab.ui.control.Label
ContKadlec	matlab.ui.control.EditField
EvaluarResultadosButton	matlab.ui.control.Button
WEFMOPFD16Label	matlab.ui.control.Label
Asm2EditField_8Label_3	matlab.ui.control.Label
MinAsWEF	matlab.ui.control.NumericEditField
ContaminanteEditField_7Label	matlab.ui.control.Label
ContWEF	matlab.ui.control.EditField
Label_5	matlab.ui.control.Label
CalibracionModeloTab	matlab.ui.container.Tab
TabGroup5	matlab.ui.container.TabGroup
ParmetrosDeterministicosTab	matlab.ui.container.Tab
Asm2EditFieldLabel	matlab.ui.control.Label
As_CM	matlab.ui.control.NumericEditField
K_tEditFieldLabel	matlab.ui.control.Label
Kt_CM	matlab.ui.control.NumericEditField
yEditFieldLabel	matlab.ui.control.Label
y_CM	matlab.ui.control.NumericEditField
thetaEditFieldLabel	matlab.ui.control.Label
Theta_CM	matlab.ui.control.NumericEditField
Qinm3dEditFieldLabel	matlab.ui.control.Label
Qin_CM	matlab.ui.control.NumericEditField
Knob2_Modelos	matlab.ui.control.DiscreteKnob
tdLabel	matlab.ui.control.Label
TiempoRH_CM	matlab.ui.control.NumericEditField
ResultadosTab_3	matlab.ui.container.Tab
DatoModelosEstd	matlab.ui.control.Label
MediaEditFieldLabel	matlab.ui.control.Label
MediaCe	matlab.ui.control.NumericEditField
DesvEstEditFieldLabel	matlab.ui.control.Label
DesvEstCe	matlab.ui.control.NumericEditField
EficienciaEditFieldLabel	matlab.ui.control.Label
EffCE	matlab.ui.control.NumericEditField
VerFrmulaEficienciaButton	matlab.ui.control.Button
PruebadeHiptesisButton	matlab.ui.control.Button
MediaEditField_2Label	matlab.ui.control.Label
MediaCm	matlab.ui.control.NumericEditField
DesvEstEditField_2Label	matlab.ui.control.Label
DesvEstCm	matlab.ui.control.NumericEditField
infol	matlab.ui.control.Button

```

SubirDatosdecampoButton      matlab.ui.control.Button
TabGroup8                     matlab.ui.container.TabGroup
TemperaturaTab               matlab.ui.container.Tab
TempAxes                     matlab.ui.control.UIAxes
TemperaturaMaximaLabel      matlab.ui.control.Label
TempMax                      matlab.ui.control.NumericEditField
PeriodoLabel                 matlab.ui.control.Label
Tper                         matlab.ui.control.NumericEditField
TemperaturaMnimaLabel       matlab.ui.control.Label
TempMin                      matlab.ui.control.NumericEditField
ModelTemp                   matlab.ui.control.Button
Button_12                    matlab.ui.control.Button
UndTempMin                   matlab.ui.control.Label
UndTempMax                   matlab.ui.control.Label
UndT_periodo                 matlab.ui.control.Label
MesdeMximaTemperaturaLabel  matlab.ui.control.Label
MaxValueMes                  matlab.ui.control.NumericEditField
SimulacinestocsticaTab     matlab.ui.container.Tab
thetaSliderLabel            matlab.ui.control.Label
thetaSlider                  matlab.ui.control.Slider
CmaxEditFieldLabel          matlab.ui.control.Label
Cmax                          matlab.ui.control.NumericEditField
CminEditFieldLabel          matlab.ui.control.Label
Cmin                          matlab.ui.control.NumericEditField
CONDICIONESDEENTRADALabel  matlab.ui.control.Label
CONDICIONESDELMODELOLabel  matlab.ui.control.Label
PromediosalidaLabel         matlab.ui.control.Label
SalidaMC                     matlab.ui.control.NumericEditField
PromediomodeloLabel        matlab.ui.control.Label
ModeloMC                     matlab.ui.control.NumericEditField
DiferenciaLabel            matlab.ui.control.Label
DiferenciaMC                matlab.ui.control.NumericEditField
LECTURAFINALLabel          matlab.ui.control.Label
K20SliderLabel              matlab.ui.control.Label
K20Slider                    matlab.ui.control.Slider
thetaLabel                   matlab.ui.control.Label
ThetaF                       matlab.ui.control.NumericEditField
K20Label                     matlab.ui.control.Label
k20F                         matlab.ui.control.NumericEditField
UIAxes10                     matlab.ui.control.UIAxes
EjecutarButton              matlab.ui.control.Button
AosLabel                     matlab.ui.control.Label
NumAn                        matlab.ui.control.Spinner
EficienciaEditField_2Label  matlab.ui.control.Label
Eff                           matlab.ui.control.NumericEditField
TRHdasEditFieldLabel        matlab.ui.control.Label
TRH                           matlab.ui.control.NumericEditField
modelacion                   matlab.ui.control.Label
UIAxes4                      matlab.ui.control.UIAxes
ButtonGroup_2                matlab.ui.container.ButtonGroup
DBO_2                        matlab.ui.control.ToggleButton
SST_2                        matlab.ui.control.ToggleButton
NT_2                          matlab.ui.control.ToggleButton
NH4_2                        matlab.ui.control.ToggleButton
NO3_2                        matlab.ui.control.ToggleButton
PT_2                          matlab.ui.control.ToggleButton
graficoscalibracion         matlab.ui.control.Button
Info2                        matlab.ui.control.Button

end

properties (Access = private)
    %Generar INFORME

```

```

usersValueArray
settingsDialog

%Valores Matriz 3D
ASM1C1=0
ASM1C4=0
ASM1C5=0
ASM1C6=0
ASM2C1=0
ASM2C2=0
ASM2C3=0
ASM2C4=0
ASM2C5=0
ASM2C6=0
ASM3C1=0
ASM4C3=0
ASM4C4=0

%Modelo Temperatura
yF
end

% Callbacks that handle component events
methods (Access = private)

% Code that executes after component creation
function startupFcn(app)
    try
        app.loadState;
    catch
    end
end

% Callback function
function StartButtonPushed(app, event)
end

% Callback function
function ShowGridMenuSelected(app, event)
end

% Menu selected function: ManualdeUsoMenu
function ManualdeUsoMenuSelected(app, event)
end
end

```

## 1.1.DISEÑO DE UN HUMEDAL

```

% Callback function: CalcularButton, CoSlider
function CalcularButton_3Pushed(app, event)
%%DISEÑO
%Condiciones de Entrada Generales
assignin('base', 'Qin', app.Qin.Value);
assignin('base', 'Tw', app.TempAvg.Value);
assignin('base', 'n', app.Manning.Value);
assignin('base', 'Co', app.CoSlider.Value);
assignin('base', 'Yselec', app.Yselec.Value);

%Condiciones de Salida

```

```

DBO=str2double(app.DBO5DropDown.Value);
SST=str2double(app.SSTDDropDown.Value);
NT=str2double(app.NTDropDown.Value);
NH4=str2double(app.NH4DropDown.Value);
NO3=str2double(app.NO3DropDown.Value);
PT=str2double(app.PTDropDown.Value);

app.cDBO.Value=num2str(3.5+0.053*app.CoSlider.Value);
app.cSST.Value=num2str(5.1+0.16*app.CoSlider.Value);

if app.DBO5Button.Value==1
    assignin('base','Ce',DBO);
    assignin('base','K20',str2double(app.K20DBO.Value));
    assignin('base','theta',str2double(app.thetaDBO.Value));
    assignin('base','Cp',str2double(app.cDBO.Value));

elseif app.SSTButton.Value==1
    assignin('base','Ce',SST);
    assignin('base','K20',str2double(app.K20SST.Value));
    assignin('base','theta',str2double(app.thetaSST.Value));
    assignin('base','Cp',str2double(app.cSST.Value));

elseif app.NTButton.Value==1
    assignin('base','Ce',(NT));
    assignin('base','K20',str2double(app.K20NT.Value));
    assignin('base','theta',str2double(app.thetaNT.Value));
    assignin('base','Cp',str2double(app.cNT.Value));

elseif app.NH4Button.Value==1
    assignin('base','Ce',NH4);
    assignin('base','K20',str2double(app.K20NH4.Value));
    assignin('base','theta',str2double(app.thetaNH4.Value));
    assignin('base','Cp',str2double(app.cNH4.Value));

elseif app.NO3Button.Value==1
    assignin('base','Ce',NO3);
    assignin('base','K20',str2double(app.K20NO3.Value));
    assignin('base','theta',str2double(app.thetaNO3.Value));
    assignin('base','Cp',str2double(app.cNO3.Value));

else
    assignin('base','Ce',PT);
    assignin('base','K20',str2double(app.K20PT.Value));
    assignin('base','theta',str2double(app.thetaPT.Value));
    assignin('base','Cp',str2double(app.cPT.Value));

end

%Simulamos en Simulink
get(app.UIAxes_3,'CurrentPoint');

switch app.Knob.Value
    case 'REED2006'
        simout=sim('REED2006_SIMULINK_AUX','StopTime',num2str(2));
        plot(app.UIAxes_3,simout.Asf.Time,simout.Asf.Data);
        legend(app.UIAxes_3,'Modelo REED');

        if app.DBO5Button.Value==1
            app.Yshow1.Value=app.Yselec.Value;
            app.As1show.Value=simout.Asf;
            app.ASM1C1=app.As1show.Value;
        elseif app.NH4Button.Value==1
            app.Yshow4.Value=app.Yselec.Value;

```

```

        app.As4show.Value=simout.Asp;
        app.ASM1C4=app.As4show.Value;

elseif app.NO3Button.Value==1
    app.Yshow5.Value=app.Yselec.Value;
    app.As5show.Value=simout.Asp;
    app.ASM1C5=app.As5show.Value;
else
    app.Yshow6.Value=app.Yselec.Value;
    app.As6show.Value=simout.Asp;
    app.ASM1C6=app.As6show.Value;
end
x=[1,2,3,4,5,6];

y=[app.As1show.Value,0,0,app.As4show.Value,app.As5show.Value,app.As6show.Val
ue];

bar(app.UIAxes2,x,y);

case 'KADLEC'
    simout=sim('KADLEC_SIMULINK','StopTime',num2str(2));
    plot(app.UIAxes_3,simout.Asf.Time, simout.Asf.Data);
    legend(app.UIAxes_3,'Modelo KADLEC');
    if app.DBO5Button.Value==1
        Kconvert=str2double(app.K20DBO.Value);
        if Kconvert<1
            msgbox('Actualice las constantes de diseño')
        end
        app.Yshow1.Value=app.Yselec.Value;
        app.As1show.Value=simout.Asp;
        app.ASM2C1=app.As1show.Value;
    elseif app.SSTButton.Value==1
        Kconvert=str2double(app.K20SST.Value);
        if Kconvert<1
            msgbox('Actualice las constantes de diseño')
        end
        app.Yshow2.Value=app.Yselec.Value;
        app.As2show.Value=simout.Asp;
        app.ASM2C2=app.As2show.Value;
    elseif app.NTButton.Value==1
        Kconvert=str2double(app.K20NT.Value);
        if Kconvert<1
            msgbox('Actualice las constantes de diseño')
        end
        app.Yshow3.Value=app.Yselec.Value;
        app.As3show.Value=simout.Asp;
        app.ASM2C3=app.As3show.Value;
    elseif app.NH4Button.Value==1
        Kconvert=str2double(app.K20NH4.Value);
        if Kconvert<1
            msgbox('Actualice las constantes de diseño')
        end
        app.Yshow4.Value=app.Yselec.Value;
        app.As4show.Value=simout.Asp;
        app.ASM2C4=app.As4show.Value;
    elseif app.NO3Button.Value==1
        Kconvert=str2double(app.K20NO3.Value);
        if Kconvert<1
            msgbox('Actualice las constantes de diseño')
        end
        app.Yshow5.Value=app.Yselec.Value;
        app.As5show.Value=simout.Asp;

```

```

        app.ASM2C5=app.As5show.Value;
    else
        Kconvert=str2double(app.K20PT.Value);
        if Kconvert<1
            msgbox('Actualice las constantes de diseño')
        end
        app.Yshow6.Value=app.Yselec.Value;
        app.As6show.Value=simout.Asp;
        app.ASM2C6=app.As6show.Value;
    end

    x=[1,2,3,4,5,6];
    y=[app.As1show.Value,app.As2show.Value,app.As3show.Value,...
        app.As4show.Value,app.As5show.Value,app.As6show.Value];
    bar(app.UIAxes2,x,y);

case 'EPA2000'
    NtConvert=str2double(app.NTanques.Value);
    if NtConvert<1
        msgbox('En número de tanques debe ser mayor igual a 1.')
    end
    assignin('base','Nseries',str2double(app.NTanques.Value));
    simout=sim('EPA2000_SIMULINK','StopTime',num2str(2));
    plot(app.UIAxes_3,simout.Asf.Time, simout.Asf.Data);
    legend(app.UIAxes_3,'Modelo EPA2000');

    if app.DB05Button.Value==1
        app.Yshow1.Value=app.Yselec.Value;
        app.As1show.Value=simout.Asp;
        app.ASM3C1=app.As1show.Value;
    end

    x=[1,2,3,4,5,6];
    y=[app.As1show.Value,0,0,0,0,0];
    bar(app.UIAxes2,x,y);

case 'WEF'
    if app.NTButton.Value==1
        simout=sim('WEF_SIMULINK','StopTime',num2str(2));
        plot(app.UIAxes_3,simout.Asf.Time, simout.Asf.Data);
        legend(app.UIAxes_3,'Modelo WEF');
        app.Yshow3.Value=app.Yselec.Value;
        app.As3show.Value=simout.Asp;
        app.ASM4C3=app.As3show.Value;

    elseif app.NH4Button.Value==1
        simout=sim('WEF_SIMULINK1','StopTime',num2str(2));
        plot(app.UIAxes_3,simout.Asf1.Time, simout.Asf1.Data);
        legend(app.UIAxes_3,'Modelo WEF');
        app.Yshow4.Value=app.Yselec.Value;
        app.As4show.Value=simout.Asp1;
        app.ASM4C4=app.As4show.Value;
    end

    x=[1,2,3,4,5,6];
    y=[0,0,app.As3show.Value,app.As4show.Value,0,0];
    bar(app.UIAxes2,x,y);

end
end

% Button pushed function: VerModeloSimulinkButton

```

```

        function VerModeloSimulinkButtonPushed(app, event)
switch app.Knob.Value
case 'REED2006'
    open_system('REED2006_SIMULINK_AUX')
case 'KADLEC'
    open_system('KADLEC_SIMULINK')
case 'EPA2000'
    open_system('EPA2000_SIMULINK')
case 'WEF'
    open_system('WEF_SIMULINK')
    open_system('WEF_SIMULINK1')
end
end

% Menu selected function:
% EstndaresNacionalesdeCalidadAmbientalparaAguaMenu
function
EstndaresNacionalesdeCalidadAmbientalparaAguaMenuSelected(app, event)
winopen('EstandaresdeAgua.pdf') %Abrir reglamento nacional
end

% Callback function
function QinEditFieldValueChanged(app, event)
end

% Button pushed function: SubirDatosdecampoButton
function SubirDatosdecampoButtonPushed(app, event)
winopen('DataIIPrueba.xlsx') %FORMATO EXCEL ESTABLECIDO
end

% Value changed function: Aslshow
function AslshowValueChanged(app, event)
end

% Value changed function: Yshow1
function Yshow1ValueChanged(app, event)
end

% Button pushed function: graficoscalibracion

```

## 1.1.CALIBRACIÓN Y MANTENIMIENTO

```

function graficoscalibracionButtonPushed(app, event)
%% READ AS MANY AS EXISTENT VALUES
Hojas_CM=size(sheetnames('DataIIPrueba.xlsx'),1);
DataSet=cell(1,Hojas_CM);
for i=1:Hojas_CM
    DataSet{1,i}=readcell('DataIIPrueba.xlsx','Sheet',i,'Range',12);
end
Kt=app.Kt_CM.Value;
t=app.TiempoRH_CM.Value;
data_DBO=cell2mat(DataSet{1});
data_SST=cell2mat(DataSet{1});
data_NT=cell2mat(DataSet{1});
data_PT=cell2mat(DataSet{4});
data_NO3=cell2mat(DataSet{5});
data_NH4=cell2mat(DataSet{6});

switch app.Knob2_Modelos.Value
case 'REED2006'
    if app.DBO_2.Value==1

```

```

Cm_DBO=data_DBO(:,3)*exp(-Kt*t);
plot(app.UIAxes4,data_DBO(:,3))
hold(app.UIAxes4,'on');
plot(app.UIAxes4,data_DBO(:,4))
plot(app.UIAxes4,Cm_DBO)
hold(app.UIAxes4,'off');
elseif app.NH4_2.Value==1
Cm_NH4=data_NH4(:,3)*exp(-Kt*t);
plot(app.UIAxes4,data_NH4(:,3))
hold(app.UIAxes4,'on');
plot(app.UIAxes4,data_NH4(:,4))
plot(app.UIAxes4,Cm_NH4)
hold(app.UIAxes4,'off');
elseif app.PT_2.Value==1
Cm_PT=data_PT(:,3)*exp(-Kt*t);
plot(app.UIAxes4,data_PT(:,3))
hold(app.UIAxes4,'on');
plot(app.UIAxes4,data_PT(:,4))
plot(app.UIAxes4,Cm_PT)
hold(app.UIAxes4,'off');
elseif app.NO3_2.Value==1
CH=app.Qin_CM.Value/app.As_CM.Value;
Cm_NO3(i,1)=data_NO3(:,3)*exp(-Kt/CH);
plot(app.UIAxes4,data_NO3(:,3))
hold(app.UIAxes4,'on');
plot(app.UIAxes4,data_NO3(:,4))
plot(app.UIAxes4,Cm_NO3)
hold(app.UIAxes4,'off');
elseif app.SST_2.Value==1
msgbox("El modelo de REED no abarca SST")
elseif app.NT_2.Value==1
msgbox("El modelo de REED no abarca NT- Nitrógenos Totales")
end
case 'KADLEC'
if app.DBO_2.Value==1
Cp_DBO=3.5+0.053*data_DBO(:,3);
Cm_DBO=Cp_DBO+(data_DBO(:,3)-Cp_DBO)*exp(-Kt/t);
plot(app.UIAxes4,data_DBO(:,3))
hold(app.UIAxes4,'on');
plot(app.UIAxes4,data_DBO(:,4))
plot(app.UIAxes4,Cm_DBO)
hold(app.UIAxes4,'off');
elseif app.SST_2.Value==1
Cp_SST=5.1+0.16*data_SST(:,3);
Cm_SST=Cp_SST+(data_SST(:,3)-Cp_SST)*exp(-Kt/t);
plot(app.UIAxes4,data_SST(:,3))
hold(app.UIAxes4,'on');
plot(app.UIAxes4,data_SST(:,4))
plot(app.UIAxes4,Cm_SST)
hold(app.UIAxes4,'off');
elseif app.NT_2.Value==1
Cp_NT=1.5;
Cm_NT=Cp_NT(i,1)+(data_NT(:,3)-Cp_NT)*exp(-Kt/t);
plot(app.UIAxes4,data_NT(:,3))
hold(app.UIAxes4,'on');
plot(app.UIAxes4,data_NT(:,4))
plot(app.UIAxes4,Cm_NT)
hold(app.UIAxes4,'off');
elseif app.NH4_2.Value==1
Cp_NH4=0.6;
Cm_NH4=Cp_NH4+(data_NH4(:,3)-Cp_NH4)*exp(-Kt/t);
plot(app.UIAxes4,data_NH4(:,3))

```

```

        hold(app.UIAxes4, 'on');
        plot(app.UIAxes4, data_NH4(:, 4))
        plot(app.UIAxes4, Cm_NH4)
        hold(app.UIAxes4, 'off');
    elseif app.PT_2.Value==1
        Cp=0.02;
        Cm_PT=Cp+(data_PT(:, 3)-Cp)*exp(-Kt/t);
        plot(app.UIAxes4, data_PT(:, 3))
        hold(app.UIAxes4, 'on');
        plot(app.UIAxes4, data_PT(:, 4))
        plot(app.UIAxes4, Cm_PT)
        hold(app.UIAxes4, 'off');
    elseif app.NO3_2.Value==1
        Cp=0;
        Cm_NO3=Cp+(data_NO3(:, 3)-Cp)*exp(-Kt/t);
        plot(app.UIAxes4, data_NO3(:, 3))
        hold(app.UIAxes4, 'on');
        plot(app.UIAxes4, data_NO3(:, 4))
        plot(app.UIAxes4, Cm_NO3)
        hold(app.UIAxes4, 'off');
    end
case 'EPA2000'
    if app.DBO_2.Value==1
        prompt = {'Ingrese el número de tanques en serie'};
        dlgtitle = 'Input';
        dims = [1 35];
        definput = {'1'};
        answer = inputdlg(prompt, dlgtitle, dims, definput);
        if isempty(answer)
            return
        end
        Cm_DBO=data_DBO(:, 3)/(1+t*Kt)^answer;
        plot(app.UIAxes4, data_DBO(:, 3))
        hold(app.UIAxes4, 'on');
        plot(app.UIAxes4, data_DBO(:, 4))
        plot(app.UIAxes4, Cm_DBO)
        hold(app.UIAxes4, 'off');
    else
        msgbox("El método del EPA2000 solo cuenta con un modelo para
DBO5")
    end
case 'WEF'
    if app.NT_2.Value==1
        CH=100*app.Qin_CM.Value/app.As_CM.Value;
        Cm_NT=0.193*data_NT(:, 3)+1.55*log(CH)-1.75;
        plot(app.UIAxes4, data_NT(:, 3))
        hold(app.UIAxes4, 'on');
        plot(app.UIAxes4, data_NT(:, 4))
        plot(app.UIAxes4, Cm_NT)
        hold(app.UIAxes4, 'off');

    elseif app.NH4_2.Value==1
        Cm_NH4=18.31*data_NH4(:, 3)*app.Qin_CM.Value/app.As_CM.Value-
0.1603;

        plot(app.UIAxes4, data_NH4(:, 3))
        hold(app.UIAxes4, 'on');
        plot(app.UIAxes4, data_NH4(:, 4))
        plot(app.UIAxes4, Cm_NH4)
        hold(app.UIAxes4, 'off');
    else
        msgbox("El método WEF MOP 16 solo tiene modelos para NT y
NH4")
    end
end

```

```

end
end
legend(app.UIAxes4, 'Co', 'Ce', 'CeModelo');
%% RESULTADOS ESTADÍSTICA
if app.DBO_2.Value==1
    app.MediacCe.Value=mean(data_DBO(:,4));
    app.DesvEstCe.Value=std(data_DBO(:,4));
    app.Mediacm.Value=mean(Cm_DBO);
    app.DesvEstCm.Value=std(Cm_DBO,1);
    app.EffCE.Value=(mean(data_DBO(:,3))-
app.MediacCe.Value)*100/mean(data_DBO(:,3));
elseif app.SST_2.Value==1
    app.MediacCe.Value=mean(data_SST(:,4));
    app.DesvEstCe.Value=std(data_SST(:,4),1);
    app.Mediacm.Value=mean(Cm_SST);
    app.DesvEstCm.Value=std(Cm_SST,1);
    app.EffCE.Value=(mean(data_SST(:,3))-
app.MediacCe.Value)*100/mean(data_SST(:,3));
elseif app.NT_2.Value==1
    app.MediacCe.Value=mean(data_NT(:,4));
    app.DesvEstCe.Value=std(data_NT(:,4),1);
    app.Mediacm.Value=mean(Cm_NT);
    app.DesvEstCm.Value=std(Cm_NT,1);
    app.EffCE.Value=(mean(data_NT(:,3))-
app.MediacCe.Value)*100/mean(data_NT(:,3));
elseif app.NH4_2.Value==1
    app.MediacCe.Value=mean(data_NH4(:,4));
    app.DesvEstCe.Value=std(data_NH4(:,4),1);
    app.Mediacm.Value=mean(Cm_NH4);
    app.DesvEstCm.Value=std(Cm_NH4,1);
    app.EffCE.Value=(mean(data_NH4(:,3))-
app.MediacCe.Value)*100/mean(data_NH4(:,3));
elseif app.NO3_2.Value==1
    app.MediacCe.Value=mean(data_NO3(:,4));
    app.DesvEstCe.Value=std(data_NO3(:,4),1);
    app.Mediacm.Value=mean(Cm_NO3);
    app.DesvEstCm.Value=std(Cm_NO3,1);
    app.EffCE.Value=(mean(data_NO3(:,3))-
app.MediacCe.Value)*100/mean(data_NO3(:,3));
else
    app.MediacCe.Value=mean(data_PT(:,4));
    app.DesvEstCe.Value=std(data_PT(:,4),1);
    app.Mediacm.Value=mean(Cm_PT);
    app.DesvEstCm.Value=std(Cm_PT,1);
    app.EffCE.Value=(mean(data_PT(:,3))-
app.MediacCe.Value)*100/mean(data_PT(:,3));
end
end

% Callback function: MaxValueMes, ModelTemp
function ModelTempPushed(app, event)
t=linspace(1,app.Tper.Value,app.Tper.Value);
y=zeros(1,app.Tper.Value);
for i=1:52
    y(i)=(app.TempMax.Value-app.TempMin.Value)*0.5*cos(2*pi()*(-
t(i)+app.MaxValueMes.Value)/52)+(app.TempMax.Value+app.TempMin.Value)*0.5;
end
app.yF=y';
plot(app.TempAxes,app.yF);
legend(app.TempAxes,'Temperatura');
end

```

```

        % Callback function: EjecutarButton, K20Slider, K20Slider,
        % ThetaF, k20F, thetaSlider, thetaSlider
        function EjecutarButtonPushed(app, event)
%% Análisis Estocástico
N =app.NumAn.Value*52;
Co_E = zeros(N,1);
Cr = zeros(N,1);
Ce_E = zeros(N,1);
KT = zeros(N,1);

Xaxis=linspace(1,N,N);
Cmaxi=app.Cmax.Value;
Cmini=app.Cmin.Value;
K20i=app.K20Slider.Value;
thetai=app.thetaSlider.Value;
yFF= repmat(app.yF,N/52,1);
assignin('base','yffwhat',yFF)

for k=1:N
    Co_E(k)=Cmaxi+rand()*Cmini;
    Cr(k)=(Cmaxi+rand()*Cmini)/app.Eff.Value;
    KT(k)=K20i*thetai^(yFF(k)-20);
    Ce_E(k)=Co_E(k)*exp(-app.TRH.Value*KT(k));
end

plot(app.UIAxes10,Xaxis,Ce_E,Xaxis,Cr,Xaxis,Co_E);
legend(app.UIAxes10,'Cm','Ce','Co');

%RESULTADOS
app.SalidaMC.Value=mean(Cr);
app.ModeloMC.Value=mean(Ce_E);
app.DiferenciaMC.Value=mean(Cr)-mean(Ce_E);

app.ThetaF.Value=app.thetaSlider.Value;
app.k20F.Value=app.K20Slider.Value;

%         hold(app.UIAxes10);
%         plot(app.UIAxes10,Xaxis,Cr);
%         hold(app.UIAxes10);
%         plot(app.UIAxes10,Xaxis,Co);
end

% Button pushed function: TabladeConstantesButton
function TabladeConstantesButtonPushed(app, event)
figH=figure;
imshow('ResumenConstantes.png');
set(figH,'Name','Constantes K/Theta/C*','NumberTitle','off')
set(gca,'units','pixels') % set the axes units to pixels
x = get(gca,'position'); % get the position of the axes
set(gcf,'units','pixels') % set the figure units to pixels
y = get(gcf,'position'); % get the figure position
set(gcf,'position',[y(1) y(2) x(3) x(4)])% set the position of the
figure to the length and width of the axes
set(gca,'units','normalized','position',[0 0 1 1]) % set the axes units
to pixels
set(gcf, 'MenuBar', 'none');
set(gcf, 'ToolBar', 'none');
end

% Menu selected function: CerrarMenu
function CerrarMenuSelected(app, event)
%     app.saveState;
delete(app)
end

```

```

        % Button pushed function: GenerarPDF
        function GenerarPDFPushed(app, event)
            app.usersValueArray =
            {app.Manning.Value, app.Yselec.Value, app.TempAvg.Value};
            app.settingsDialog = DescripcionPDFv4; % Llamar a la Descripcion.mlapp
            app.settingsDialog.initfcn(app.usersValueArray, app.HumePUCP) % Enviar
            data desde HUMEPUCP a DescripcionPDF
            %
            % uiwait(app.HumePUCP) % Wait for user to complete dialog
            box

        end

        % Close request function: HumePUCP
        function HumePUCPCloseRequest(app, event)
%       app.saveState;
            close(app.HumePUCP)

        end

        % Button pushed function: TeoriaEcuacionesButton
        function TeoriaEcuacionesButtonPushed(app, event)
            winopen('ResumenEcuaciones.pdf')
        end

        % Value changed function: Yselec
        function YselecValueChanged(app, event)
%       value = app.Yselec.Value;

        end

        % Button pushed function: EvaluarResultadosButton

```

## 1.2.RESULTADOS DEL DISEÑO

```

        function EvaluarResultadosButtonPushed(app, event)
%       %% RESULTADOS DE DISEÑO
%       %Asignando Valores a la Matriz Zaux
            Zaux=[ app.ASM1C1, 0, 0, app.ASM1C4, app.ASM1C5,
            app.ASM1C6; ...
            app.ASM2C1, app.ASM2C2, app.ASM2C3, app.ASM2C4, app.ASM2C5,
            app.ASM2C6; ...
            app.ASM3C1, 0, 0, 0, 0,
            0; ...
            0, 0, app.ASM4C3, app.ASM4C4, 0,
            0];

            z=transpose(Zaux);
            width=0.3;
            h=bar3(app.UIAxes9,z,width);
            zlim auto;

            hh = get(h(3),'parent');
            set(hh,'YTick', 1:1:6, 'YTickLabel', {'DBO5', 'SST',
            'NT', 'NH4', 'NO3', 'PT'});
            set(hh,'XTick', 1:1:4, 'XTickLabel', {'REED', 'KADLEC', 'EPA2000', 'WEF
            MOP FD-16'});
            set(hh,'FontSize',10);

            ax = hh;
            ax.ZAxis.Exponent = 0;
            box on;
            close(gcf)

```

```

%Obteniendo mínimos requeridos para mostrar
%REED
app.MinAsReed.Value=max(Zaux(1,:));
if app.MinAsReed.Value==app.ASM1C1
    app.ContReed.Value='DBO5';
elseif app.MinAsReed.Value==app.ASM1C4
    app.ContReed.Value='NH4';
elseif app.MinAsReed.Value==app.ASM1C5
    app.ContReed.Value='NO3';
else
    app.ContReed.Value='PT';
end
%KADLEC
app.MinAsKadlec.Value=max(Zaux(2,:));
if app.MinAsKadlec.Value==app.ASM2C1
    app.ContKadlec.Value='DBO5';
elseif app.MinAsKadlec.Value==app.ASM2C2
    app.ContKadlec.Value='SST';
elseif app.MinAsKadlec.Value==app.ASM2C3
    app.ContKadlec.Value='NT';
elseif app.MinAsKadlec.Value==app.ASM2C4
    app.ContKadlec.Value='NH4';
elseif app.MinAsKadlec.Value==app.ASM2C5
    app.ContKadlec.Value='NO3';
else
    app.ContKadlec.Value='PT';
end
%EPA
app.MinAsEPA.Value=Zaux(3,1);
app.ContEPA.Value='DBO5';
%WEF
app.MinAsWEF.Value=max(Zaux(4,:));
if app.MinAsWEF.Value==app.ASM4C3
    app.ContWEF.Value='NT';
else
    app.ContWEF.Value='NH4';
end

end

    % Callback function
    function NuevoMenuSelected(app, event)
answerf = questdlg('¿Desea antes guardar los cambios?', ...
    'Nuevo Archivo', ...
    'Si', 'Cancelar', 'Cancelar');
% Handle response
switch answerf
    case 'Si'
        %app.saveState
        state.fileEditField.Value = app.K20DBO.Value;
%         state.locationEditField.Value = app.locationEditField.Value;
        save('*.mat', 'state');
        msgbox('Los datos'
    case 'Cancelar'
        delete(app.HumePUCP);
        HUMEPUCPv4; %Reset
end

end

% Callback function
function AbrirMenuSelected(app, event)

```

```

[file1,] = uigetfile('*.mlapp'); %open a mat file
if isequal(file1,0)
    disp('El usuario seleccionó cancelar');
else
    winopen(file1);
end
end

% Button pushed function: VerFrmulaEficienciaButton
function VerFrmulaEficienciaButtonPushed(app, event)
figH=figure;
imshow('EQUATION2_EFFICIENCYETHA.png');
set(figH,'Name','Teoria de Ecuaciones','NumberTitle','off')
set(gca,'units','pixels') % set the axes units to pixels
x = get(gca,'position'); % get the position of the axes
set(gcf,'units','pixels') % set the figure units to pixels
y = get(gcf,'position'); % get the figure position
set(gcf,'position',[y(1) y(2) x(3) x(4)])% set the position of the
figure to the length and width of the axes
set(gca,'units','normalized','position',[0 0 1 1]) % set the axes units
to pixels
set(gcf, 'MenuBar', 'none');
set(gcf, 'ToolBar', 'none');
end

% Button pushed function: PruebadeHiptesisButton
function PruebadeHiptesisButtonPushed(app, event)
% Prueba T-Student
DataSet_DBO=cell2mat(readcell('DataIIPrueba.xlsx','Sheet',1,'Range',12));
Cm_REED=DataSet_DBO(:,3)*exp(-app.Kt_CM.Value*app.TiempoRH_CM.Value);
[h,p,~,df]=ttest2(DataSet_DBO(:,4),Cm_REED);
dff = struct2cell(df(1));
% Message Box
msg = cell(10,1);
msg{1} = sprintf('Resultados de la prueba T-Student');
DF=dff{2};
msg{3} = sprintf(['DF = ',num2str(DF)]);
ALFA=0.05;
msg{4} = sprintf(['ALFA = ',num2str(ALFA)]);
pvalue=p;
msg{5} = sprintf(['p value = ',num2str(pvalue)]);
say={};
if h==1
    say='Se rechaza la hipótesis nula H0. Hay una diferencia
estadísticamente significativa entre ambas muestras. ';
elseif h==0
    say='Se toma la hipótesis nula H0. No hay pruebas suficientes para
afirmar que ambas curvas sean estadísticamente diferentes. ';
end
end
msg{6} = sprintf(say);
%Editar Dialog Box
msgboxEdit=msgbox(msg,'Prueba de Hipótesis T-Student');
th = findall(msgboxEdit, 'Type', 'Text');
th.FontSize = 10;
%Tamaño Dialog Box
deltaWidth = sum(th.Extent([1,3]))-msgboxEdit.Position(3) +
th.Extent(1);
deltaHeight = sum(th.Extent([2,4]))-msgboxEdit.Position(4) + 10;
msgboxEdit.Position([3,4]) = msgboxEdit.Position([3,4]) + [deltaWidth,
deltaHeight];

```

```

msgboxEdit.Resize = 'on';
end

% Size changed function: DiseoTab
function DiseoTabSizeChanged(app, event)

end

% Callback function
function NuevoMenuSelected2(app, event)
    answerf = questdlg('¿Desea antes guardar los cambios?', ...
        'Nuevo Archivo', ...
        'Si', 'Cancelar', 'Cancelar');
    % Handle response
    switch answerf
        case 'Si'
            %app.saveState
            state.fileEditField.Value = app.K20DBO.Value;
            % state.locationEditField.Value =
app.locationEditField.Value;
            app.GuardarCambios(s,e,state.fileEditField.Value)

        case 'Cancelar'
            delete(app.HumePUCP);
            HUMEPUCPv4; %Reset
    end
end

end

% Component initialization
methods (Access = private)

% Create UIFigure and components
function createComponents(app)

    % Create HumePUCP and hide until all components are created
    app.HumePUCP = uifigure('Visible', 'off');
    app.HumePUCP.AutoResizeChildren = 'off';
    app.HumePUCP.Position = [100 100 1106 589];
    app.HumePUCP.Name = 'Hume PUCP';
    app.HumePUCP.Resize = 'off';
    app.HumePUCP.CloseRequestFcn = createCallbackFcn(app,
    @HumePUCPCloseRequest, true);

    % Create ArchivoMenu
    app.ArchivoMenu = uimenu(app.HumePUCP);
    app.ArchivoMenu.Tooltip = {'HELLO'};
    app.ArchivoMenu.Text = 'Archivo';

    % Create CerrarMenu
    app.CerrarMenu = uimenu(app.ArchivoMenu);
    app.CerrarMenu.MenuSelectedFcn = createCallbackFcn(app,
    @CerrarMenuSelected, true);
    app.CerrarMenu.Text = 'Cerrar';

    % Create ManualdeUsoMenu
    app.ManualdeUsoMenu = uimenu(app.HumePUCP);
    app.ManualdeUsoMenu.MenuSelectedFcn = createCallbackFcn(app,
    @ManualdeUsoMenuSelected, true);
    app.ManualdeUsoMenu.Text = 'Manual de Uso';

    % Create GuadeusoMenu
    app.GuadeusoMenu = uimenu(app.ManualdeUsoMenu);
    app.GuadeusoMenu.Text = 'Guía de uso';

```

```

% Create ProyencampoMenu
app.ProyencampoMenu = uimenu(app.ManualdeUsoMenu);
app.ProyencampoMenu.Text = 'Proy. en campo';

% Create InformacionMenu
app.InformacionMenu = uimenu(app.HumePUCP);
app.InformacionMenu.Text = 'Informacion';

% Create EstndaresNacionalesdeCalidadAmbientalparaAguaMenu
app.EstndaresNacionalesdeCalidadAmbientalparaAguaMenu =
uimenu(app.InformacionMenu);

app.EstndaresNacionalesdeCalidadAmbientalparaAguaMenu.MenuSelectedFcn =
createCallbackFcn(app,
@EstndaresNacionalesdeCalidadAmbientalparaAguaMenuSelected, true);
app.EstndaresNacionalesdeCalidadAmbientalparaAguaMenu.Text =
'Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua';

% Create DeldesarrolladorMenu
app.DeldesarrolladorMenu = uimenu(app.InformacionMenu);
app.DeldesarrolladorMenu.Text = 'Del desarrollador';

% Create Documentacion
app.Documentacion = uimenu(app.InformacionMenu);
app.Documentacion.Text = 'Documentación (Tesis)';

% Create TabGroup
app.TabGroup = uitabgroup(app.HumePUCP);
app.TabGroup.AutoResizeChildren = 'off';
app.TabGroup.Position = [1 0 1106 590];

% Create DiseoTab
app.DiseoTab = uitab(app.TabGroup);
app.DiseoTab.AutoResizeChildren = 'off';
app.DiseoTab.SizeChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@DiseoTabSizeChanged, true);
app.DiseoTab.Title = 'Diseño';
app.DiseoTab.BackgroundColor = [0.902 0.902 0.902];

% Create CondicionesdeEntradaPanel
app.CondicionesdeEntradaPanel = uipanel(app.DiseoTab);
app.CondicionesdeEntradaPanel.AutoResizeChildren = 'off';
app.CondicionesdeEntradaPanel.Tooltip = {'Las concentraciones de
contaminante de entrada (Co) [mg/l] puede variar con los sliders en cada
gráfico a la derecha.'};
app.CondicionesdeEntradaPanel.Title = 'Condiciones de Entrada';
app.CondicionesdeEntradaPanel.BackgroundColor = [1 1 1];
app.CondicionesdeEntradaPanel.FontWeight = 'bold';
app.CondicionesdeEntradaPanel.Position = [28 405 415 91];

% Create m3daLabel
app.m3daLabel = uilabel(app.CondicionesdeEntradaPanel);
app.m3daLabel.Position = [158 34 42 22];
app.m3daLabel.Text = 'm3/día';

% Create CLabel
app.CLabel = uilabel(app.CondicionesdeEntradaPanel);
app.CLabel.Position = [156 10 25 22];
app.CLabel.Text = '°C';

% Create Label_4
app.Label_4 = uilabel(app.CondicionesdeEntradaPanel);
app.Label_4.Position = [337 39 25 22];

```

```

app.Label_4.Text = '[' ];

% Create QinEditField_3Label
app.QinEditField_3Label =
uilabel(app.CondicionesdeEntradaPanel);
app.QinEditField_3Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.QinEditField_3Label.Position = [33 36 25 22];
app.QinEditField_3Label.Text = 'Qin';

% Create Qin
app.Qin = uieditfield(app.CondicionesdeEntradaPanel, 'numeric');
app.Qin.Position = [73 36 62 22];
app.Qin.Value = 1000;

% Create TwEditFieldLabel
app.TwEditFieldLabel = uilabel(app.CondicionesdeEntradaPanel);
app.TwEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.TwEditFieldLabel.Position = [31 9 25 22];
app.TwEditFieldLabel.Text = 'Tw';

% Create TempAvg
app.TempAvg = uieditfield(app.CondicionesdeEntradaPanel,
'numeric');
app.TempAvg.Position = [71 9 64 22];
app.TempAvg.Value = 15;

% Create Label_8
app.Label_8 = uilabel(app.CondicionesdeEntradaPanel);
app.Label_8.Position = [337 9 25 22];
app.Label_8.Text = '[' ];

% Create NLabel
app.NLabel = uilabel(app.CondicionesdeEntradaPanel);
app.NLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.NLabel.Position = [232 10 25 22];
app.NLabel.Text = 'N';

% Create NTanques
app.NTanques = uieditfield(app.CondicionesdeEntradaPanel,
'text');
app.NTanques.HorizontalAlignment = 'right';
app.NTanques.Tooltip = {'Número de humedales en serie (Ver
Teoría de Ecuaciones)'; ''};
app.NTanques.Position = [287 10 45 22];
app.NTanques.Value = '1';

% Create nEditFieldLabel
app.nEditFieldLabel = uilabel(app.CondicionesdeEntradaPanel);
app.nEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.nEditFieldLabel.Position = [235 41 25 22];
app.nEditFieldLabel.Text = 'n';

% Create Manning
app.Manning = uieditfield(app.CondicionesdeEntradaPanel,
'numeric');
app.Manning.Position = [288 38 44 22];
app.Manning.Value = 0.65;

% Create CondicionesdeDiseoLabel
app.CondicionesdeDiseoLabel = uilabel(app.DiseoTab);
app.CondicionesdeDiseoLabel.FontSize = 20;
app.CondicionesdeDiseoLabel.FontWeight = 'bold';
app.CondicionesdeDiseoLabel.Position = [133 517 229 25];
app.CondicionesdeDiseoLabel.Text = 'Condiciones de Diseño';

```

```

% Create CondicionesdeSalidaPanel
app.CondicionesdeSalidaPanel = uipanel(app.DiseoTab);
app.CondicionesdeSalidaPanel.AutoResizeChildren = 'off';
app.CondicionesdeSalidaPanel.Title = 'Condiciones de Salida';
app.CondicionesdeSalidaPanel.BackgroundColor = [1 1 1];
app.CondicionesdeSalidaPanel.FontWeight = 'bold';
app.CondicionesdeSalidaPanel.Position = [28 207 415 176];

% Create mgLLabel
app.mgLLabel = uilabel(app.CondicionesdeSalidaPanel);
app.mgLLabel.Position = [180 117 32 22];
app.mgLLabel.Text = 'mg/L';

% Create mgLLabel_2
app.mgLLabel_2 = uilabel(app.CondicionesdeSalidaPanel);
app.mgLLabel_2.Position = [180 95 32 22];
app.mgLLabel_2.Text = 'mg/L';

% Create mgLLabel_3
app.mgLLabel_3 = uilabel(app.CondicionesdeSalidaPanel);
app.mgLLabel_3.Position = [180 74 32 22];
app.mgLLabel_3.Text = 'mg/L';

% Create mgLLabel_4
app.mgLLabel_4 = uilabel(app.CondicionesdeSalidaPanel);
app.mgLLabel_4.Position = [180 53 32 22];
app.mgLLabel_4.Text = 'mg/L';

% Create DBO5Label_4
app.DBO5Label_4 = uilabel(app.CondicionesdeSalidaPanel);
app.DBO5Label_4.HorizontalAlignment = 'right';
app.DBO5Label_4.Position = [20 117 38 22];
app.DBO5Label_4.Text = 'DBO5';

% Create DBO5DropDown
app.DBO5DropDown = uidropdown(app.CondicionesdeSalidaPanel);
app.DBO5DropDown.Items = {'20', '15', '10', '5', '3'};
app.DBO5DropDown.Tooltip = {'1.- Riego de vegetales'; '2.-
Bebida animales'; '3.-Ríos'; '4.- Lagunas'};
app.DBO5DropDown.Position = [74 117 100 22];
app.DBO5DropDown.Value = '20';

% Create PTDropDownLabel
app.PTDropDownLabel = uilabel(app.CondicionesdeSalidaPanel);
app.PTDropDownLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.PTDropDownLabel.Position = [34 11 25 22];
app.PTDropDownLabel.Text = 'PT';

% Create PTDropDown
app.PTDropDown = uidropdown(app.CondicionesdeSalidaPanel);
app.PTDropDown.Items = {'2', '0.15', '0.1', '0.124', '0.062',
'0.05', '0.025'};
app.PTDropDown.Position = [74 11 100 22];
app.PTDropDown.Value = '2';

% Create NTDropDownLabel
app.NTDropDownLabel = uilabel(app.CondicionesdeSalidaPanel);
app.NTDropDownLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.NTDropDownLabel.Position = [32 74 25 22];
app.NTDropDownLabel.Text = 'NT';

% Create NTDropDown
app.NTDropDown = uidropdown(app.CondicionesdeSalidaPanel);

```

```

    app.NTDropDown.Items = {'10', '1', '0.6', '0.4', '0.315', '0.1',
''};
    app.NTDropDown.Position = [74 74 100 22];
    app.NTDropDown.Value = '10';

    % Create SSTDropDownLabel
    app.SSTDropDownLabel = uilabel(app.CondicionesdeSalidaPanel);
    app.SSTDropDownLabel.HorizontalAlignment = 'right';
    app.SSTDropDownLabel.Position = [33 95 29 22];
    app.SSTDropDownLabel.Text = 'SST';

    % Create SSTDropDown
    app.SSTDropDown = uidropdown(app.CondicionesdeSalidaPanel);
    app.SSTDropDown.Items = {'100', '80', '70', '60', '25', ''};
    app.SSTDropDown.Position = [74 95 100 22];
    app.SSTDropDown.Value = '25';

    % Create NH4DropDownLabel
    app.NH4DropDownLabel = uilabel(app.CondicionesdeSalidaPanel);
    app.NH4DropDownLabel.HorizontalAlignment = 'right';
    app.NH4DropDownLabel.Position = [27 53 30 22];
    app.NH4DropDownLabel.Text = 'NH4';

    % Create NH4DropDown
    app.NH4DropDown = uidropdown(app.CondicionesdeSalidaPanel);
    app.NH4DropDown.Items = {'2', '1.9', '1.5', '1', '0.55'};
    app.NH4DropDown.Position = [74 53 100 22];
    app.NH4DropDown.Value = '2';

    % Create NO3DropDown_2Label
    app.NO3DropDown_2Label = uilabel(app.CondicionesdeSalidaPanel);
    app.NO3DropDown_2Label.HorizontalAlignment = 'right';
    app.NO3DropDown_2Label.Position = [28 32 30 22];
    app.NO3DropDown_2Label.Text = 'NO3';

    % Create NO3DropDown
    app.NO3DropDown = uidropdown(app.CondicionesdeSalidaPanel);
    app.NO3DropDown.Items = {'200', '100', '50', '16', '13', '10',
'5'};
    app.NO3DropDown.Position = [74 32 100 22];
    app.NO3DropDown.Value = '5';

    % Create mgLLabel_5
    app.mgLLabel_5 = uilabel(app.CondicionesdeSalidaPanel);
    app.mgLLabel_5.Position = [180 32 32 22];
    app.mgLLabel_5.Text = 'mg/L';

    % Create mgLLabel_6
    app.mgLLabel_6 = uilabel(app.CondicionesdeSalidaPanel);
    app.mgLLabel_6.Position = [180 11 32 22];
    app.mgLLabel_6.Text = 'mg/L';

    % Create Label_7
    app.Label_7 = uilabel(app.CondicionesdeSalidaPanel);
    app.Label_7.VerticalAlignment = 'top';
    app.Label_7.Position = [235 40 159 73];
    app.Label_7.Text = {'Referirse a los LMP vigentes.'; ''; 'Ir a
la parte superior'; 'pestaña de información'; 'de este aplicativo.'};

    % Create TabGroup4
    app.TabGroup4 = uitabgroup(app.DiseoTab);
    app.TabGroup4.AutoResizeChildren = 'off';
    app.TabGroup4.Position = [466 9 626 442];

    % Create Graficos

```

```

app.Graficos = uitab(app.TabGroup4);
app.Graficos.AutoResizeChildren = 'off';
app.Graficos.Title = 'Gráficos Area';

% Create ButtonGroup
app.ButtonGroup = uibuttongroup(app.Graficos);
app.ButtonGroup.AutoResizeChildren = 'off';
app.ButtonGroup.Position = [1 34 555 45];

% Create DBO5Button
app.DBO5Button = uitogglebutton(app.ButtonGroup);
app.DBO5Button.Text = 'DBO5';
app.DBO5Button.Position = [8 9 84 25];
app.DBO5Button.Value = true;

% Create SSTButton
app.SSTButton = uitogglebutton(app.ButtonGroup);
app.SSTButton.Text = 'SST';
app.SSTButton.Position = [99 8 81 26];

% Create NTButton
app.NTButton = uitogglebutton(app.ButtonGroup);
app.NTButton.Text = 'NT';
app.NTButton.Position = [195 8 76 26];

% Create NH4Button
app.NH4Button = uitogglebutton(app.ButtonGroup);
app.NH4Button.Text = 'NH4';
app.NH4Button.Position = [281 8 75 26];

% Create NO3Button
app.NO3Button = uitogglebutton(app.ButtonGroup);
app.NO3Button.Text = 'NO3';
app.NO3Button.Position = [368 8 75 26];

% Create PTButton
app.PTButton = uitogglebutton(app.ButtonGroup);
app.PTButton.Text = 'PT';
app.PTButton.Position = [454 9 75 26];

% Create UIAxes_3
app.UIAxes_3 = uiaxes(app.Graficos);
title(app.UIAxes_3, 'Área Superficial (As) vs Profundidad (Y)')
xlabel(app.UIAxes_3, 'Y (m)')
ylabel(app.UIAxes_3, 'As (m2)')
app.UIAxes_3.PlotBoxAspectRatio = [1.71705426356589 1 1];
app.UIAxes_3.XTick = [0 0.2 0.4 0.6 0.8 1];
app.UIAxes_3.Position = [1 94 529 318];

% Create SeleccioneYfinalmLabel
app.SeleccioneYfinalmLabel = uilabel(app.Graficos);
app.SeleccioneYfinalmLabel.Position = [180 11 229 23];
app.SeleccioneYfinalmLabel.Text = 'Seleccione Y final (m)';

% Create Yselec
app.Yselec = uieditfield(app.Graficos, 'numeric');
app.Yselec.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@YselecValueChanged, true);
app.Yselec.Tooltip = {'¿Qué valor de "Y" empleará?'};
app.Yselec.Position = [311 12 78 22];
app.Yselec.Value = 0.5;

% Create CoSliderLabel
app.CoSliderLabel = uilabel(app.Graficos);

```

```

app.CoSliderLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.CoSliderLabel.Position = [556 118 25 22];
app.CoSliderLabel.Text = 'Co';

% Create CoSlider
app.CoSlider = uislider(app.Graficos);
app.CoSlider.Limits = [10 90];
app.CoSlider.Orientation = 'vertical';
app.CoSlider.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@CalcularButton_3Pushed, true);
app.CoSlider.Position = [560 142 3 253];
app.CoSlider.Value = 80;

% Create ResumenAsTab
app.ResumenAsTab = uitab(app.TabGroup4);
app.ResumenAsTab.AutoResizeChildren = 'off';
app.ResumenAsTab.Title = 'Resumen As';

% Create UIAxes2
app.UIAxes2 = uiaxes(app.ResumenAsTab);
title(app.UIAxes2, 'Gráfico de barras de resultados (Áreas
Superficiales)');
xlabel(app.UIAxes2, '');
ylabel(app.UIAxes2, 'As (m2)');
app.UIAxes2.PlotBoxAspectRatio = [1.98473282442748 1 1];
app.UIAxes2.XTick = [0.1 0.2 0.4 0.6 0.8 0.9];
app.UIAxes2.XTickLabel = {'DBO5'; 'SST'; 'NT'; 'NH4'; 'NO3';
'PT'};
app.UIAxes2.Position = [5 116 616 289];

% Create DBO5Label
app.DBO5Label = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.DBO5Label.BackgroundColor = [0.3922 0.8314 0.0745];
app.DBO5Label.HorizontalAlignment = 'center';
app.DBO5Label.Position = [45 80 62 22];
app.DBO5Label.Text = 'DBO5';

% Create YmLabel
app.YmLabel = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.YmLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.YmLabel.Position = [5 50 42 22];
app.YmLabel.Text = 'Y(m)';

% Create Yshow1
app.Yshow1 = uieditfield(app.ResumenAsTab, 'numeric');
app.Yshow1.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@Yshow1ValueChanged, true);
app.Yshow1.Editable = 'off';
app.Yshow1.Position = [50 52 51 22];

% Create Asm2Label
app.Asm2Label = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.Asm2Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.Asm2Label.Position = [4 30 47 22];
app.Asm2Label.Text = 'As (m2)';

% Create Aslshow
app.Aslshow = uieditfield(app.ResumenAsTab, 'numeric');
app.Aslshow.ValueDisplayFormat = '%.0F';
app.Aslshow.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@AslshowValueChanged, true);
app.Aslshow.Editable = 'off';
app.Aslshow.Position = [50 31 51 22];

```

```

% Create YmEditField_2Label
app.YmEditField_2Label = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.YmEditField_2Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.YmEditField_2Label.Position = [119 52 35 22];
app.YmEditField_2Label.Text = 'Y (m)';

% Create Yshow2
app.Yshow2 = uieditfield(app.ResumenAsTab, 'numeric');
app.Yshow2.Editable = 'off';
app.Yshow2.Position = [153 52 55 22];

% Create Asm2EditField_2Label
app.Asm2EditField_2Label = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.Asm2EditField_2Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.Asm2EditField_2Label.Position = [103 31 47 22];
app.Asm2EditField_2Label.Text = 'As (m2)';

% Create As2show
app.As2show = uieditfield(app.ResumenAsTab, 'numeric');
app.As2show.ValueDisplayFormat = '%.0f';
app.As2show.Editable = 'off';
app.As2show.Position = [153 31 55 22];

% Create YmEditField_3Label
app.YmEditField_3Label = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.YmEditField_3Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.YmEditField_3Label.Position = [215 52 35 22];
app.YmEditField_3Label.Text = 'Y (m)';

% Create Yshow3
app.Yshow3 = uieditfield(app.ResumenAsTab, 'numeric');
app.Yshow3.Editable = 'off';
app.Yshow3.Position = [254 52 51 22];

% Create Asm2EditField_3Label
app.Asm2EditField_3Label = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.Asm2EditField_3Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.Asm2EditField_3Label.Position = [208 30 47 22];
app.Asm2EditField_3Label.Text = 'As (m2)';

% Create As3show
app.As3show = uieditfield(app.ResumenAsTab, 'numeric');
app.As3show.ValueDisplayFormat = '%.0f';
app.As3show.Editable = 'off';
app.As3show.Position = [254 30 51 22];

% Create NH4Label_2
app.NH4Label_2 = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.NH4Label_2.BackgroundColor = [0.3922 0.8314 0.0745];
app.NH4Label_2.HorizontalAlignment = 'center';
app.NH4Label_2.Position = [352 80 54 22];
app.NH4Label_2.Text = 'NH4';

% Create YmEditField_4Label
app.YmEditField_4Label = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.YmEditField_4Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.YmEditField_4Label.Position = [316 53 35 22];
app.YmEditField_4Label.Text = 'Y (m)';

% Create Yshow4
app.Yshow4 = uieditfield(app.ResumenAsTab, 'numeric');
app.Yshow4.Editable = 'off';
app.Yshow4.Position = [355 53 49 22];

```

```

% Create Asm2EditField_4Label
app.Asm2EditField_4Label = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.Asm2EditField_4Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.Asm2EditField_4Label.Position = [310 31 47 22];
app.Asm2EditField_4Label.Text = 'As (m2)';

% Create As4show
app.As4show = uieditfield(app.ResumenAsTab, 'numeric');
app.As4show.ValueDisplayFormat = '%.0F';
app.As4show.Editable = 'off';
app.As4show.Position = [355 32 49 22];

% Create NO3Label_2
app.NO3Label_2 = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.NO3Label_2.BackgroundColor = [0.3922 0.8314 0.0745];
app.NO3Label_2.HorizontalAlignment = 'center';
app.NO3Label_2.Position = [457 80 55 22];
app.NO3Label_2.Text = 'NO3';

% Create YmEditField_5Label
app.YmEditField_5Label = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.YmEditField_5Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.YmEditField_5Label.Position = [422 52 35 22];
app.YmEditField_5Label.Text = 'Y (m)';

% Create Yshow5
app.Yshow5 = uieditfield(app.ResumenAsTab, 'numeric');
app.Yshow5.Editable = 'off';
app.Yshow5.Position = [456 51 56 22];

% Create Asm2EditField_8Label
app.Asm2EditField_8Label = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.Asm2EditField_8Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.Asm2EditField_8Label.Position = [409 30 47 22];
app.Asm2EditField_8Label.Text = 'As (m2)';

% Create As5show
app.As5show = uieditfield(app.ResumenAsTab, 'numeric');
app.As5show.ValueDisplayFormat = '%.0F';
app.As5show.Editable = 'off';
app.As5show.Position = [456 30 56 22];

% Create PTLLabel_2
app.PTLabel_2 = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.PTLabel_2.BackgroundColor = [0.3922 0.8314 0.0745];
app.PTLabel_2.HorizontalAlignment = 'center';
app.PTLabel_2.Position = [569 80 55 22];
app.PTLabel_2.Text = 'PT';

% Create YmEditField_6Label
app.YmEditField_6Label = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.YmEditField_6Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.YmEditField_6Label.Position = [520 52 35 22];
app.YmEditField_6Label.Text = 'Y (m)';

% Create Yshow6
app.Yshow6 = uieditfield(app.ResumenAsTab, 'numeric');
app.Yshow6.Editable = 'off';
app.Yshow6.Position = [568 51 56 22];

% Create Asm2EditField_8Label_2
app.Asm2EditField_8Label_2 = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.Asm2EditField_8Label_2.HorizontalAlignment = 'right';
app.Asm2EditField_8Label_2.Position = [522 30 41 22];
app.Asm2EditField_8Label_2.Text = 'As (m2)';

```

```

% Create As6show
app.As6show = uieditfield(app.ResumenAsTab, 'numeric');
app.As6show.ValueDisplayFormat = '%.0f';
app.As6show.Editable = 'off';
app.As6show.Position = [568 30 56 22];

% Create SSTLabel_3
app.SSTLabel_3 = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.SSTLabel_3.BackgroundColor = [0.3922 0.8314 0.0745];
app.SSTLabel_3.HorizontalAlignment = 'center';
app.SSTLabel_3.Position = [150 80 62 22];
app.SSTLabel_3.Text = 'SST';

% Create NTLLabel_2
app.NTLLabel_2 = uilabel(app.ResumenAsTab);
app.NTLLabel_2.BackgroundColor = [0.3922 0.8314 0.0745];
app.NTLLabel_2.HorizontalAlignment = 'center';
app.NTLLabel_2.Position = [249 80 62 22];
app.NTLLabel_2.Text = 'NT';

% Create VerModeloSimulinkButton
app.VerModeloSimulinkButton = uibutton(app.DiseoTab, 'push');
app.VerModeloSimulinkButton.ButtonPushedFcn =
createCallbackFcn(app, @VerModeloSimulinkButtonPushed, true);
app.VerModeloSimulinkButton.Position = [751 515 130 22];
app.VerModeloSimulinkButton.Text = 'Ver Modelo Simulink';

% Create CalcularButton
app.CalcularButton = uibutton(app.DiseoTab, 'push');
app.CalcularButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@CalcularButton_3Pushed, true);
app.CalcularButton.Position = [766 474 100 22];
app.CalcularButton.Text = 'Calcular';

% Create Knob
app.Knob = uiknob(app.DiseoTab, 'discrete');
app.Knob.Items = {'REED2006', 'KADLEC', 'EPA2000', 'WEF'};
app.Knob.Position = [572 462 76 76];
app.Knob.Value = 'REED2006';

% Create ConstantesdeDiseoPanel
app.ConstantesdeDiseoPanel = uipanel(app.DiseoTab);
app.ConstantesdeDiseoPanel.AutoResizeChildren = 'off';
app.ConstantesdeDiseoPanel.Title = 'Constantes de Diseño';
app.ConstantesdeDiseoPanel.BackgroundColor = [1 1 1];
app.ConstantesdeDiseoPanel.FontWeight = 'bold';
app.ConstantesdeDiseoPanel.Position = [28 13 415 176];

% Create TeoriaEcuacionesButton
app.TeoriaEcuacionesButton =
uibutton(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'push');
app.TeoriaEcuacionesButton.ButtonPushedFcn =
createCallbackFcn(app, @TeoriaEcuacionesButtonPushed, true);
app.TeoriaEcuacionesButton.Position = [66 5 116 23];
app.TeoriaEcuacionesButton.Text = 'Teoria Ecuaciones';

% Create TabladeConstantesButton
app.TabladeConstantesButton =
uibutton(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'push');
app.TabladeConstantesButton.ButtonPushedFcn =
createCallbackFcn(app, @TabladeConstantesButtonPushed, true);
app.TabladeConstantesButton.Position = [235 5 121 23];
app.TabladeConstantesButton.Text = 'Tabla de Constantes';

```

```

% Create K20EditField_18Label
app.K20EditField_18Label = uilabel(app.ConstantesdeDiseoPanel);
app.K20EditField_18Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.K20EditField_18Label.FontWeight = 'bold';
app.K20EditField_18Label.Position = [7 113 27 22];
app.K20EditField_18Label.Text = 'K20';

% Create K20DBO
app.K20DBO = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.K20DBO.HorizontalAlignment = 'right';
app.K20DBO.FontWeight = 'bold';
app.K20DBO.Position = [43 110 45 22];
app.K20DBO.Value = '0.678';

% Create EditField_20Label
app.EditField_20Label = uilabel(app.ConstantesdeDiseoPanel);
app.EditField_20Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.EditField_20Label.FontWeight = 'bold';
app.EditField_20Label.Position = [7 83 25 22];
app.EditField_20Label.Text = 'ÿ';

% Create thetaDBO
app.thetaDBO = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.thetaDBO.HorizontalAlignment = 'right';
app.thetaDBO.FontWeight = 'bold';
app.thetaDBO.Position = [43 80 45 22];
app.thetaDBO.Value = '1.06';

% Create CLabel_2
app.CLabel_2 = uilabel(app.ConstantesdeDiseoPanel);
app.CLabel_2.HorizontalAlignment = 'right';
app.CLabel_2.FontWeight = 'bold';
app.CLabel_2.Position = [7 52 25 22];
app.CLabel_2.Text = 'C*';

% Create cDBO
app.cDBO = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.cDBO.Editable = 'off';
app.cDBO.HorizontalAlignment = 'right';
app.cDBO.FontWeight = 'bold';
app.cDBO.Position = [43 49 45 22];
app.cDBO.Value = '9.86';

% Create DBO5Label_5
app.DBO5Label_5 = uilabel(app.ConstantesdeDiseoPanel);
app.DBO5Label_5.FontWeight = 'bold';
app.DBO5Label_5.Position = [46 134 39 22];
app.DBO5Label_5.Text = 'DBO5';

% Create SSTLabel_2
app.SSTLabel_2 = uilabel(app.ConstantesdeDiseoPanel);
app.SSTLabel_2.FontWeight = 'bold';
app.SSTLabel_2.Position = [116 134 29 22];
app.SSTLabel_2.Text = 'SST';

% Create NTLabel
app.NTLabel = uilabel(app.ConstantesdeDiseoPanel);
app.NTLabel.FontWeight = 'bold';
app.NTLabel.Position = [173 134 25 22];
app.NTLabel.Text = 'NT';

% Create NH4Label
app.NH4Label = uilabel(app.ConstantesdeDiseoPanel);
app.NH4Label.FontWeight = 'bold';

```

```

app.NH4Label.Position = [227 134 30 22];
app.NH4Label.Text = 'NH4';

% Create K20SST
app.K20SST = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.K20SST.HorizontalAlignment = 'right';
app.K20SST.FontWeight = 'bold';
app.K20SST.Position = [105 110 45 22];
app.K20SST.Value = '0';

% Create K20NT
app.K20NT = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.K20NT.HorizontalAlignment = 'right';
app.K20NT.FontWeight = 'bold';
app.K20NT.Position = [167 110 45 22];
app.K20NT.Value = '0';

% Create K20NH4
app.K20NH4 = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.K20NH4.HorizontalAlignment = 'right';
app.K20NH4.FontWeight = 'bold';
app.K20NH4.Position = [222 110 45 22];
app.K20NH4.Value = '0.2187';

% Create thetaSST
app.thetaSST = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.thetaSST.HorizontalAlignment = 'right';
app.thetaSST.FontWeight = 'bold';
app.thetaSST.Position = [105 78 45 22];
app.thetaSST.Value = '1.15';

% Create thetaNT
app.thetaNT = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.thetaNT.HorizontalAlignment = 'right';
app.thetaNT.FontWeight = 'bold';
app.thetaNT.Position = [165 78 45 22];
app.thetaNT.Value = '1.06';

% Create thetaNH4
app.thetaNH4 = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.thetaNH4.HorizontalAlignment = 'right';
app.thetaNH4.FontWeight = 'bold';
app.thetaNH4.Position = [222 77 45 22];
app.thetaNH4.Value = '1.1048';

% Create cSST
app.cSST = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.cSST.Editable = 'off';
app.cSST.HorizontalAlignment = 'right';
app.cSST.FontWeight = 'bold';
app.cSST.Position = [105 49 45 22];
app.cSST.Value = '24.3';

% Create cNT
app.cNT = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.cNT.Editable = 'off';
app.cNT.HorizontalAlignment = 'right';
app.cNT.FontWeight = 'bold';
app.cNT.Position = [166 49 45 22];
app.cNT.Value = '1.5';

% Create cNH4
app.cNH4 = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.cNH4.Editable = 'off';

```

```

app.cNH4.HorizontalAlignment = 'right';
app.cNH4.FontWeight = 'bold';
app.cNH4.Position = [222 49 45 22];
app.cNH4.Value = '0';

% Create K20NO3
app.K20NO3 = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.K20NO3.HorizontalAlignment = 'right';
app.K20NO3.FontWeight = 'bold';
app.K20NO3.Position = [279 110 45 22];
app.K20NO3.Value = '1';

% Create thetaNO3
app.thetaNO3 = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.thetaNO3.HorizontalAlignment = 'right';
app.thetaNO3.FontWeight = 'bold';
app.thetaNO3.Position = [279 77 45 22];
app.thetaNO3.Value = '1.15';

% Create cNO3
app.cNO3 = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.cNO3.Editable = 'off';
app.cNO3.HorizontalAlignment = 'right';
app.cNO3.FontWeight = 'bold';
app.cNO3.Position = [279 49 45 22];
app.cNO3.Value = '0';

% Create K20PT
app.K20PT = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.K20PT.HorizontalAlignment = 'right';
app.K20PT.FontWeight = 'bold';
app.K20PT.Position = [337 110 45 22];
app.K20PT.Value = '1';

% Create thetaPT
app.thetaPT = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.thetaPT.HorizontalAlignment = 'right';
app.thetaPT.FontWeight = 'bold';
app.thetaPT.Position = [337 77 45 22];
app.thetaPT.Value = '1.15';

% Create cPT
app.cPT = uieditfield(app.ConstantesdeDiseoPanel, 'text');
app.cPT.Editable = 'off';
app.cPT.HorizontalAlignment = 'right';
app.cPT.FontWeight = 'bold';
app.cPT.Position = [337 49 45 22];
app.cPT.Value = '0.02';

% Create NO3Label
app.NO3Label = uilabel(app.ConstantesdeDiseoPanel);
app.NO3Label.FontWeight = 'bold';
app.NO3Label.Position = [287 134 30 22];
app.NO3Label.Text = 'NO3';

% Create PTLabel
app.PTLabel = uilabel(app.ConstantesdeDiseoPanel);
app.PTLabel.FontWeight = 'bold';
app.PTLabel.Position = [348 134 25 22];
app.PTLabel.Text = 'PT';

% Create GenerarPDF
app.GenerarPDF = uibutton(app.DiseoTab, 'push');

```

```

app.GenerarPDF.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@GenerarPDFPushed, true);
app.GenerarPDF.Icon = 'PDFIcon.jpg';
app.GenerarPDF.Position = [1002 493 73 66];
app.GenerarPDF.Text = '';

% Create GenerarReporteLabel
app.GenerarReporteLabel = uilabel(app.DiseoTab);
app.GenerarReporteLabel.FontWeight = 'bold';
app.GenerarReporteLabel.Position = [986 462 100 22];
app.GenerarReporteLabel.Text = 'Generar Reporte';

% Create ResultadosDiseoTab
app.ResultadosDiseoTab = uitab(app.TabGroup);
app.ResultadosDiseoTab.AutoResizeChildren = 'off';
app.ResultadosDiseoTab.Title = 'Resultados Diseo';

% Create Asm2EditField_5Label
app.Asm2EditField_5Label = uilabel(app.ResultadosDiseoTab);
app.Asm2EditField_5Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.Asm2EditField_5Label.Position = [56 400 47 22];
app.Asm2EditField_5Label.Text = 'As (m2)';

% Create MinAsReed
app.MinAsReed = uieditfield(app.ResultadosDiseoTab, 'numeric');
app.MinAsReed.Editable = 'off';
app.MinAsReed.Position = [143 400 100 22];
app.MinAsReed.Value = 3500;

% Create KADLECYKNIGHTLabel
app.KADLECYKNIGHTLabel = uilabel(app.ResultadosDiseoTab);
app.KADLECYKNIGHTLabel.FontWeight = 'bold';
app.KADLECYKNIGHTLabel.Position = [68 357 116 22];
app.KADLECYKNIGHTLabel.Text = 'KADLEC Y KNIGHT';

% Create EPA2000Label
app.EPA2000Label = uilabel(app.ResultadosDiseoTab);
app.EPA2000Label.FontWeight = 'bold';
app.EPA2000Label.Position = [68 257 59 22];
app.EPA2000Label.Text = 'EPA 2000';

% Create REED2006Label
app.REED2006Label = uilabel(app.ResultadosDiseoTab);
app.REED2006Label.FontWeight = 'bold';
app.REED2006Label.Position = [68 463 69 22];
app.REED2006Label.Text = 'REED 2006';

% Create Asm2EditField_6Label
app.Asm2EditField_6Label = uilabel(app.ResultadosDiseoTab);
app.Asm2EditField_6Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.Asm2EditField_6Label.Position = [56 194 47 22];
app.Asm2EditField_6Label.Text = 'As (m2)';

% Create MinAsEPA
app.MinAsEPA = uieditfield(app.ResultadosDiseoTab, 'numeric');
app.MinAsEPA.Editable = 'off';
app.MinAsEPA.Position = [143 194 100 22];
app.MinAsEPA.Value = 5525;

% Create Asm2EditField_7Label
app.Asm2EditField_7Label = uilabel(app.ResultadosDiseoTab);
app.Asm2EditField_7Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.Asm2EditField_7Label.Position = [56 305 47 22];
app.Asm2EditField_7Label.Text = 'As (m2)';

```

```

% Create MinAsKadlec
app.MinAsKadlec = uieditfield(app.ResultadosDiseoTab,
'numeric');
app.MinAsKadlec.Editable = 'off';
app.MinAsKadlec.Position = [143 305 100 22];
app.MinAsKadlec.Value = 9400;

% Create UIAxes9
app.UIAxes9 = uiaxes(app.ResultadosDiseoTab);
title(app.UIAxes9, 'Resumen de Áreas')
xlabel(app.UIAxes9, 'Metodología')
ylabel(app.UIAxes9, 'Contaminante')
app.UIAxes9.PlotBoxAspectRatio = [1.48692810457516 1 1];
app.UIAxes9.FontSize = 20;
app.UIAxes9.FontWeight = 'bold';
app.UIAxes9.Position = [361 24 698 488];

% Create ContaminanteEditField_4Label
uilabel(app.ResultadosDiseoTab);
app.ContaminanteEditField_4Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.ContaminanteEditField_4Label.Position = [56 431 80 22];
app.ContaminanteEditField_4Label.Text = 'Contaminante';

% Create ContReed
app.ContReed = uieditfield(app.ResultadosDiseoTab, 'text');
app.ContReed.Editable = 'off';
app.ContReed.Position = [143 431 100 22];
app.ContReed.Value = 'DB05';

% Create ContaminanteEditField_5Label
uilabel(app.ResultadosDiseoTab);
app.ContaminanteEditField_5Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.ContaminanteEditField_5Label.Position = [56 225 80 22];
app.ContaminanteEditField_5Label.Text = 'Contaminante';

% Create ContEPA
app.ContEPA = uieditfield(app.ResultadosDiseoTab, 'text');
app.ContEPA.Editable = 'off';
app.ContEPA.Position = [143 225 100 22];
app.ContEPA.Value = 'DB05';

% Create ContaminanteEditField_6Label
uilabel(app.ResultadosDiseoTab);
app.ContaminanteEditField_6Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.ContaminanteEditField_6Label.Position = [56 337 80 22];
app.ContaminanteEditField_6Label.Text = 'Contaminante';

% Create ContKadlec
app.ContKadlec = uieditfield(app.ResultadosDiseoTab, 'text');
app.ContKadlec.Editable = 'off';
app.ContKadlec.Position = [143 337 100 22];
app.ContKadlec.Value = 'DB05';

% Create EvaluarResultadosButton
app.EvaluarResultadosButton = uibutton(app.ResultadosDiseoTab,
'push');
app.EvaluarResultadosButton.ButtonPushedFcn =
createCallbackFcn(app, @EvaluarResultadosButtonPushed, true);
app.EvaluarResultadosButton.FontSize = 16;
app.EvaluarResultadosButton.Position = [939 526 152 28];

```

```

app.EvaluarResultadosButton.Text = 'Evaluar Resultados';

% Create WEFMOPFD16Label
app.WEFMOPFD16Label = uilabel(app.ResultadosDiseoTab);
app.WEFMOPFD16Label.FontWeight = 'bold';
app.WEFMOPFD16Label.Position = [68 151 99 22];
app.WEFMOPFD16Label.Text = 'WEF MOP FD-16';

% Create Asm2EditField_8Label_3
app.Asm2EditField_8Label_3 = uilabel(app.ResultadosDiseoTab);
app.Asm2EditField_8Label_3.HorizontalAlignment = 'right';
app.Asm2EditField_8Label_3.Position = [56 88 47 22];
app.Asm2EditField_8Label_3.Text = 'As (m2)';

% Create MinAsWEF
app.MinAsWEF = uieditfield(app.ResultadosDiseoTab, 'numeric');
app.MinAsWEF.Editable = 'off';
app.MinAsWEF.Position = [143 88 100 22];
app.MinAsWEF.Value = 15030;

% Create ContaminanteEditField_7Label
uilabel(app.ResultadosDiseoTab);
app.ContaminanteEditField_7Label = uilabel(app.ResultadosDiseoTab);
app.ContaminanteEditField_7Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.ContaminanteEditField_7Label.Position = [56 119 80 22];
app.ContaminanteEditField_7Label.Text = 'Contaminante';

% Create ContWEF
app.ContWEF = uieditfield(app.ResultadosDiseoTab, 'text');
app.ContWEF.Editable = 'off';
app.ContWEF.Position = [143 119 100 22];
app.ContWEF.Value = 'PT';

% Create Label_5
app.Label_5 = uilabel(app.ResultadosDiseoTab);
app.Label_5.FontSize = 16;
app.Label_5.FontWeight = 'bold';
app.Label_5.Position = [48 511 314 28];
app.Label_5.Text = 'Valores requeridos por metodología';

% Create CalibracionModeloTab
app.CalibracionModeloTab = uitab(app.TabGroup);
app.CalibracionModeloTab.AutoResizeChildren = 'off';
app.CalibracionModeloTab.Title = 'Calibracion Modelo';

% Create TabGroup5
app.TabGroup5 = uitabgroup(app.CalibracionModeloTab);
app.TabGroup5.AutoResizeChildren = 'off';
app.TabGroup5.Position = [7 383 460 145];

% Create ParmetrosDeterministicosTab
app.ParmetrosDeterministicosTab = uitab(app.TabGroup5);
app.ParmetrosDeterministicosTab.AutoResizeChildren = 'off';
app.ParmetrosDeterministicosTab.Title = 'Parámetros
Determinísticos';

% Create Asm2EditFieldLabel
uilabel(app.ParmetrosDeterministicosTab);
app.Asm2EditFieldLabel = uilabel(app.ParmetrosDeterministicosTab);
app.Asm2EditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.Asm2EditFieldLabel.Position = [329 91 47 22];
app.Asm2EditFieldLabel.Text = 'As (m2)';

% Create As_CM

```

```

app.As_CM = uieditfield(app.ParmetrosDeterminsticosTab,
'numeric');
app.As_CM.Position = [391 88 54 25];
app.As_CM.Value = 20000;

% Create K_tEditFieldLabel
app.K_tEditFieldLabel = uilabel(app.ParmetrosDeterminsticosTab);
app.K_tEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.K_tEditFieldLabel.Position = [351 70 25 22];
app.K_tEditFieldLabel.Text = 'K_t';

% Create Kt_CM
app.Kt_CM = uieditfield(app.ParmetrosDeterminsticosTab,
'numeric');
app.Kt_CM.Position = [391 70 54 22];
app.Kt_CM.Value = 0.406;

% Create yEditFieldLabel
app.yEditFieldLabel = uilabel(app.ParmetrosDeterminsticosTab);
app.yEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.yEditFieldLabel.Position = [351 49 25 22];
app.yEditFieldLabel.Text = 'y';

% Create y_CM
app.y_CM = uieditfield(app.ParmetrosDeterminsticosTab,
'numeric');
app.y_CM.Position = [391 46 54 25];
app.y_CM.Value = 0.5;

% Create thetaEditFieldLabel
app.thetaEditFieldLabel =
uilabel(app.ParmetrosDeterminsticosTab);
app.thetaEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.thetaEditFieldLabel.Position = [344 25 32 22];
app.thetaEditFieldLabel.Text = 'theta';

% Create Theta_CM
app.Theta_CM = uieditfield(app.ParmetrosDeterminsticosTab,
'numeric');
app.Theta_CM.Position = [391 22 54 25];
app.Theta_CM.Value = 1.01;

% Create Qinm3dEditFieldLabel
app.Qinm3dEditFieldLabel =
uilabel(app.ParmetrosDeterminsticosTab);
app.Qinm3dEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.Qinm3dEditFieldLabel.Position = [202 85 62 22];
app.Qinm3dEditFieldLabel.Text = 'Qin (m3/d)';

% Create Qin_CM
app.Qin_CM = uieditfield(app.ParmetrosDeterminsticosTab,
'numeric');
app.Qin_CM.Position = [279 82 54 25];
app.Qin_CM.Value = 1000;

% Create Knob2_Modelos
app.Knob2_Modelos = uiknob(app.ParmetrosDeterminsticosTab,
'discrete');
app.Knob2_Modelos.Items = {'REED2006', 'KADLEC', 'EPA2000',
'WEF'};
app.Knob2_Modelos.Position = [79 20 62 62];
app.Knob2_Modelos.Value = 'REED2006';

% Create tdLabel
app.tdLabel = uilabel(app.ParmetrosDeterminsticosTab);

```

```

app.tdLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.tdLabel.Position = [237 48 27 22];
app.tdLabel.Text = 't (d)';

% Create TiempoRH_CM
app.TiempoRH_CM = uieditfield(app.ParmetrosDeterministicosTab,
'numeric');
app.TiempoRH_CM.Tooltip = {'Tiempo de Retención Hidráulica
(Tiempo de llenado del humedal)'};
app.TiempoRH_CM.Position = [279 45 54 25];
app.TiempoRH_CM.Value = 1;

% Create ResultadosTab_3
app.ResultadosTab_3 = uitab(app.TabGroup5);
app.ResultadosTab_3.AutoResizeChildren = 'off';
app.ResultadosTab_3.Title = 'Resultados';

% Create DatoModelosEstd
app.DatoModelosEstd = uilabel(app.ResultadosTab_3);
app.DatoModelosEstd.HorizontalAlignment = 'center';
app.DatoModelosEstd.FontWeight = 'bold';
app.DatoModelosEstd.Position = [6 92 216 23];
app.DatoModelosEstd.Text = 'Resumen [C] Salida / Modelo';

% Create MediaEditFieldLabel
app.MediaEditFieldLabel = uilabel(app.ResultadosTab_3);
app.MediaEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.MediaEditFieldLabel.Position = [37 66 38 22];
app.MediaEditFieldLabel.Text = 'Media';

% Create MediaCe
app.MediaCe = uieditfield(app.ResultadosTab_3, 'numeric');
app.MediaCe.Position = [107 66 32 22];

% Create DesvEstEditFieldLabel
app.DesvEstEditFieldLabel = uilabel(app.ResultadosTab_3);
app.DesvEstEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.DesvEstEditFieldLabel.Position = [37 34 59 22];
app.DesvEstEditFieldLabel.Text = 'Desv. Est.';

% Create DesvEstCe
app.DesvEstCe = uieditfield(app.ResultadosTab_3, 'numeric');
app.DesvEstCe.Position = [107 34 32 22];

% Create EficienciaEditFieldLabel
app.EficienciaEditFieldLabel = uilabel(app.ResultadosTab_3);
app.EficienciaEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.EficienciaEditFieldLabel.Position = [6 1 67 22];
app.EficienciaEditFieldLabel.Text = 'Eficiencia  $\psi$ ';

% Create EffCE
app.EffCE = uieditfield(app.ResultadosTab_3, 'numeric');
app.EffCE.ValueDisplayFormat = '%0.2f%%';
app.EffCE.Position = [84 1 55 22];

% Create VerFrmulaEficienciaButton
app.VerFrmulaEficienciaButton = uibutton(app.ResultadosTab_3,
'push');
app.VerFrmulaEficienciaButton.ButtonPushedFcn =
createCallbackFcn(app, @VerFrmulaEficienciaButtonPushed, true);
app.VerFrmulaEficienciaButton.Position = [276 64 135 22];
app.VerFrmulaEficienciaButton.Text = 'Ver Fórmula Eficiencia';

% Create PruebadeHiptesisButton

```

```

app.PruebadeHiptesisButton = uibutton(app.ResultadosTab_3,
'push');
app.PruebadeHiptesisButton.ButtonPushedFcn =
createCallbackFcn(app, @PruebadeHiptesisButtonPushed, true);
app.PruebadeHiptesisButton.Position = [282 24 123 22];
app.PruebadeHiptesisButton.Text = 'Prueba de Hipótesis';

% Create MediaEditField_2Label
app.MediaEditField_2Label = uilabel(app.ResultadosTab_3);
app.MediaEditField_2Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.MediaEditField_2Label.Position = [164 66 38 22];
app.MediaEditField_2Label.Text = 'Media';

% Create MediaCm
app.MediaCm = uieditfield(app.ResultadosTab_3, 'numeric');
app.MediaCm.Position = [217 66 36 22];

% Create DesvEstEditField_2Label
app.DesvEstEditField_2Label = uilabel(app.ResultadosTab_3);
app.DesvEstEditField_2Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.DesvEstEditField_2Label.Position = [156 34 59 22];
app.DesvEstEditField_2Label.Text = 'Desv. Est.';

% Create DesvEstCm
app.DesvEstCm = uieditfield(app.ResultadosTab_3, 'numeric');
app.DesvEstCm.Position = [214 34 32 22];

% Create info1
app.info1 = uibutton(app.ResultadosTab_3, 'push');
app.info1.BackgroundColor = [0.0353 0.5725 0.9294];
app.info1.FontWeight = 'bold';
app.info1.Tooltip = {'Solo aplicable al Método de Reed para
DB05. Ver documentación.'};
app.info1.Position = [412 24 17 22];
app.info1.Text = 'i';

% Create SubirDatosdecampoButton
app.SubirDatosdecampoButton = uibutton(app.CalibracionModeloTab,
'push');
app.SubirDatosdecampoButton.ButtonPushedFcn =
createCallbackFcn(app, @SubirDatosdecampoButtonPushed, true);
app.SubirDatosdecampoButton.BackgroundColor = [0 0.451 0.7412];
app.SubirDatosdecampoButton.FontWeight = 'bold';
app.SubirDatosdecampoButton.FontColor = [1 1 1];
app.SubirDatosdecampoButton.Tooltip = {'Colocación de datos
reales recogidos en campo'};
app.SubirDatosdecampoButton.Position = [158 533 187 25];
app.SubirDatosdecampoButton.Text = 'Subir Datos de campo';

% Create TabGroup8
app.TabGroup8 = uitabgroup(app.CalibracionModeloTab);
app.TabGroup8.AutoResizeChildren = 'off';
app.TabGroup8.Position = [477 0 629 534];

% Create TemperaturaTab
app.TemperaturaTab = uitab(app.TabGroup8);
app.TemperaturaTab.AutoResizeChildren = 'off';
app.TemperaturaTab.Title = 'Temperatura';

% Create TempAxes
app.TempAxes = uiaxes(app.TemperaturaTab);
title(app.TempAxes, 'Modelación Temperatura')
xlabel(app.TempAxes, 'Semana')
ylabel(app.TempAxes, 'Temperatura °C')

```

```

app.TempAxes.PlotBoxAspectRatio = [2.90086206896552 1 1];
app.TempAxes.Position = [20 11 600 270];

% Create TemperaturaMaximaLabel
app.TemperaturaMaximaLabel = uilabel(app.TemperaturaTab);
app.TemperaturaMaximaLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.TemperaturaMaximaLabel.Position = [26 384 118 22];
app.TemperaturaMaximaLabel.Text = 'Temperatura Maxima';

% Create TempMax
app.TempMax = uieditfield(app.TemperaturaTab, 'numeric');
app.TempMax.Position = [155 384 100 22];
app.TempMax.Value = 17.5;

% Create PeriodoLabel
app.PeriodoLabel = uilabel(app.TemperaturaTab);
app.PeriodoLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.PeriodoLabel.Position = [350 385 47 22];
app.PeriodoLabel.Text = 'Periodo';

% Create Tper
app.Tper = uieditfield(app.TemperaturaTab, 'numeric');
app.Tper.Editable = 'off';
app.Tper.Position = [412 385 100 22];
app.Tper.Value = 52;

% Create TemperaturaMnimaLabel
app.TemperaturaMnimaLabel = uilabel(app.TemperaturaTab);
app.TemperaturaMnimaLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.TemperaturaMnimaLabel.Position = [28 344 116 22];
app.TemperaturaMnimaLabel.Text = 'Temperatura Mínima';

% Create TempMin
app.TempMin = uieditfield(app.TemperaturaTab, 'numeric');
app.TempMin.Position = [155 344 100 22];
app.TempMin.Value = 13.5;

% Create ModelTemp
app.ModelTemp = uibutton(app.TemperaturaTab, 'push');
app.ModelTemp.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@ModelTempPushed, true);
app.ModelTemp.Position = [270 298 100 22];
app.ModelTemp.Text = 'Generar';

% Create Button_12
app.Button_12 = uibutton(app.TemperaturaTab, 'push');
app.Button_12.Icon = 'TempEq.png';
app.Button_12.Position = [26 421 587 76];
app.Button_12.Text = '';

% Create UndTempMin
app.UndTempMin = uilabel(app.TemperaturaTab);
app.UndTempMin.HorizontalAlignment = 'right';
app.UndTempMin.Position = [262 344 25 22];
app.UndTempMin.Text = 'C';

% Create UndTempMax
app.UndTempMax = uilabel(app.TemperaturaTab);
app.UndTempMax.HorizontalAlignment = 'right';
app.UndTempMax.Position = [263 384 25 22];
app.UndTempMax.Text = 'C';

% Create UndT_periodo
app.UndT_periodo = uilabel(app.TemperaturaTab);

```

```

app.UndT_periodo.HorizontalAlignment = 'right';
app.UndT_periodo.Tooltip = {'52 semanas <> 1 año'};
app.UndT_periodo.Position = [507 386 54 22];
app.UndT_periodo.Text = 'semanas';

% Create MesdeMximaTemperaturaLabel
app.MesdeMximaTemperaturaLabel = uilabel(app.TemperaturaTab);
app.MesdeMximaTemperaturaLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.MesdeMximaTemperaturaLabel.Position = [319 333 94 46];
app.MesdeMximaTemperaturaLabel.Text = {'Mes de Máxima ' ;
'Temperatura'};

% Create MaxValueMes
app.MaxValueMes = uieditfield(app.TemperaturaTab, 'numeric');
app.MaxValueMes.Limits = [1 12];
app.MaxValueMes.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@ModelTempPushed, true);
app.MaxValueMes.Position = [422 346 88 22];
app.MaxValueMes.Value = 1;

% Create SimulacinestocsticaTab
app.SimulacinestocsticaTab = uitab(app.TabGroup8);
app.SimulacinestocsticaTab.AutoResizeChildren = 'off';
app.SimulacinestocsticaTab.Title = 'Simulación estocástica';

% Create thetaSliderLabel
app.thetaSliderLabel = uilabel(app.SimulacinestocsticaTab);
app.thetaSliderLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.thetaSliderLabel.Position = [558 -2 32 22];
app.thetaSliderLabel.Text = 'theta';

% Create thetaSlider
app.thetaSlider = uislider(app.SimulacinestocsticaTab);
app.thetaSlider.Limits = [0.9 1.2];
app.thetaSlider.Orientation = 'vertical';
app.thetaSlider.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@EjecutarButtonPushed, true);
app.thetaSlider.ValueChangingFcn = createCallbackFcn(app,
@EjecutarButtonPushed, true);
app.thetaSlider.Position = [573 25 3 288];
app.thetaSlider.Value = 1.06;

% Create CmaxEditFieldLabel
app.CmaxEditFieldLabel = uilabel(app.SimulacinestocsticaTab);
app.CmaxEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.CmaxEditFieldLabel.Position = [14 460 37 22];
app.CmaxEditFieldLabel.Text = 'Cmax';

% Create Cmax
app.Cmax = uieditfield(app.SimulacinestocsticaTab, 'numeric');
app.Cmax.Position = [66 460 56 22];
app.Cmax.Value = 25;

% Create CminEditFieldLabel
app.CminEditFieldLabel = uilabel(app.SimulacinestocsticaTab);
app.CminEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.CminEditFieldLabel.Position = [14 435 34 22];
app.CminEditFieldLabel.Text = 'Cmin';

% Create Cmin
app.Cmin = uieditfield(app.SimulacinestocsticaTab, 'numeric');
app.Cmin.Position = [68 435 54 22];
app.Cmin.Value = 15;

% Create CONDICIONESDEENTRADALabel

```

```

app.CONDICIONESDEENTRADALabel =
uilabel(app.SimulacinestocsticaTab);
app.CONDICIONESDEENTRADALabel.FontWeight = 'bold';
app.CONDICIONESDEENTRADALabel.Position = [12 481 172 22];
app.CONDICIONESDEENTRADALabel.Text = 'CONDICIONES DE ENTRADA';

% Create CONDICIONESDELMODELOLabel
app.CONDICIONESDELMODELOLabel =
uilabel(app.SimulacinestocsticaTab);
app.CONDICIONESDELMODELOLabel.FontWeight = 'bold';
app.CONDICIONESDELMODELOLabel.Position = [27 410 174 22];
app.CONDICIONESDELMODELOLabel.Text = 'CONDICIONES DEL MODELO';

% Create PromediosalidaLabel
app.PromediosalidaLabel = uilabel(app.SimulacinestocsticaTab);
app.PromediosalidaLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.PromediosalidaLabel.Position = [20 386 102 22];
app.PromediosalidaLabel.Text = 'Promedio [] salida';

% Create SalidaMC
app.SalidaMC = uieditfield(app.SimulacinestocsticaTab,
'numeric');
app.SalidaMC.Position = [145 386 54 22];

% Create PromediomodeloLabel
app.PromediomodeloLabel = uilabel(app.SimulacinestocsticaTab);
app.PromediomodeloLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.PromediomodeloLabel.Position = [20 358 110 22];
app.PromediomodeloLabel.Text = 'Promedio [] modelo';

% Create ModeloMC
app.ModeloMC = uieditfield(app.SimulacinestocsticaTab,
'numeric');
app.ModeloMC.Position = [145 358 53 22];

% Create DiferenciaLabel
app.DiferenciaLabel = uilabel(app.SimulacinestocsticaTab);
app.DiferenciaLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.DiferenciaLabel.Position = [229 376 59 19];
app.DiferenciaLabel.Text = 'Diferencia';

% Create DiferenciaMC
app.DiferenciaMC = uieditfield(app.SimulacinestocsticaTab,
'numeric');
app.DiferenciaMC.Position = [299 376 61 19];

% Create LECTURAFINALLabel
app.LECTURAFINALLabel = uilabel(app.SimulacinestocsticaTab);
app.LECTURAFINALLabel.FontWeight = 'bold';
app.LECTURAFINALLabel.Position = [489 410 101 34];
app.LECTURAFINALLabel.Text = 'LECTURA FINAL';

% Create K20SliderLabel
app.K20SliderLabel = uilabel(app.SimulacinestocsticaTab);
app.K20SliderLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.K20SliderLabel.Position = [20 322 27 22];
app.K20SliderLabel.Text = 'K20';

% Create K20Slider
app.K20Slider = uislider(app.SimulacinestocsticaTab);
app.K20Slider.Limits = [0.65 0.68];
app.K20Slider.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@EjecutarButtonPushed, true);

```

```

        app.K20Slider.ValueChangingFcn = createCallbackFcn(app,
@EjecutarButtonPushed, true);
        app.K20Slider.Position = [68 341 480 3];
        app.K20Slider.Value = 0.672;

        % Create thetaLabel
        app.thetaLabel = uilabel(app.SimulacinestocsticaTab);
        app.thetaLabel.HorizontalAlignment = 'right';
        app.thetaLabel.Position = [532 375 36 22];
        app.thetaLabel.Text = '[theta]';

        % Create ThetaF
        app.ThetaF = uieditfield(app.SimulacinestocsticaTab, 'numeric');
        app.ThetaF.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@EjecutarButtonPushed, true);
        app.ThetaF.Editable = 'off';
        app.ThetaF.Position = [579 374 40 30];
        app.ThetaF.Value = 1.06;

        % Create K20Label
        app.K20Label = uilabel(app.SimulacinestocsticaTab);
        app.K20Label.HorizontalAlignment = 'right';
        app.K20Label.Position = [443 374 31 22];
        app.K20Label.Text = '[K20]';

        % Create k20F
        app.k20F = uieditfield(app.SimulacinestocsticaTab, 'numeric');
        app.k20F.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@EjecutarButtonPushed, true);
        app.k20F.Editable = 'off';
        app.k20F.Position = [480 375 40 29];
        app.k20F.Value = 1.1;

        % Create UIAxes10
        app.UIAxes10 = uiaxes(app.SimulacinestocsticaTab);
        title(app.UIAxes10, 'Simulación Estocástica')
        xlabel(app.UIAxes10, 'Tiempo (semanas)')
        ylabel(app.UIAxes10, 'Concentración Contaminante (mg/l)')
        app.UIAxes10.PlotBoxAspectRatio = [1.92307692307692 1 1];
        app.UIAxes10.Position = [12 1 540 304];

        % Create EjecutarButton
        app.EjecutarButton = uibutton(app.SimulacinestocsticaTab,
'push');
        app.EjecutarButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@EjecutarButtonPushed, true);
        app.EjecutarButton.Position = [518 481 100 22];
        app.EjecutarButton.Text = 'Ejecutar';

        % Create AosLabel
        app.AosLabel = uilabel(app.SimulacinestocsticaTab);
        app.AosLabel.HorizontalAlignment = 'right';
        app.AosLabel.Position = [160 435 33 22];
        app.AosLabel.Text = 'Años';

        % Create NumAn
        app.NumAn = uispinner(app.SimulacinestocsticaTab);
        app.NumAn.Limits = [1 Inf];
        app.NumAn.Tooltip = {'Nota: 52 semanas equivalen aproximadamente
a 1 año.'};
        app.NumAn.Position = [229 434 47 23];
        app.NumAn.Value = 1;

        % Create EficienciaEditField_2Label

```

```

app.EficienciaEditField_2Label =
uilabel(app.SimulacinestocsticaTab);
app.EficienciaEditField_2Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.EficienciaEditField_2Label.Position = [160 460 57 22];
app.EficienciaEditField_2Label.Text = 'Eficiencia';

% Create Eff
app.Eff = uieditfield(app.SimulacinestocsticaTab, 'numeric');
app.Eff.Tooltip = {'¿Cuántas veces mayor es la concentración de
entrada respecto a la concentración de salida esperada?'};
app.Eff.Position = [229 460 38 22];
app.Eff.Value = 3.3;

% Create TRHdasEditFieldLabel
app.TRHdasEditFieldLabel = uilabel(app.SimulacinestocsticaTab);
app.TRHdasEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.TRHdasEditFieldLabel.Position = [304 461 63 22];
app.TRHdasEditFieldLabel.Text = {'TRH [días]'; ''};

% Create TRH
app.TRH = uieditfield(app.SimulacinestocsticaTab, 'numeric');
app.TRH.Tooltip = {'Tiempo de Retención Hidráulica: Valor que
resulta del volumen total del humedal entre el tiempo que toma llenar hasta
la altura deseada.'};
app.TRH.Position = [369 460 42 22];
app.TRH.Value = 2.2;

% Create modelacion
app.modelacion = uilabel(app.CalibracionModeloTab);
app.modelacion.FontSize = 18;
app.modelacion.FontWeight = 'bold';
app.modelacion.Position = [581 536 427 23];
app.modelacion.Text = 'Modelación con Montecarlo [Metodología
REED]';

% Create UIAxes4
app.UIAxes4 = uiaxes(app.CalibracionModeloTab);
title(app.UIAxes4, 'Posible desempeño de Humedal Artificial')
xlabel(app.UIAxes4, 'Semana')
ylabel(app.UIAxes4, 'DBO5 (mg/l)')
app.UIAxes4.PlotBoxAspectRatio = [1.72832369942197 1 1];
app.UIAxes4.Position = [4 11 460 295];

% Create ButtonGroup_2
app.ButtonGroup_2 = uibuttongroup(app.CalibracionModeloTab);
app.ButtonGroup_2.AutoResizeChildren = 'off';
app.ButtonGroup_2.Position = [5 309 460 45];

% Create DBO_2
app.DBO_2 = uitogglebutton(app.ButtonGroup_2);
app.DBO_2.Text = 'DBO5';
app.DBO_2.Position = [39 11 58 21];
app.DBO_2.Value = true;

% Create SST_2
app.SST_2 = uitogglebutton(app.ButtonGroup_2);
app.SST_2.Text = 'SST';
app.SST_2.Position = [101 10 58 22];

% Create NT_2
app.NT_2 = uitogglebutton(app.ButtonGroup_2);
app.NT_2.Text = 'NT';
app.NT_2.Position = [166 10 58 22];

```

```

% Create NH4_2
app.NH4_2 = uitogglebutton(app.ButtonGroup_2);
app.NH4_2.Text = 'NH4';
app.NH4_2.Position = [232 10 58 22];

% Create NO3_2
app.NO3_2 = uitogglebutton(app.ButtonGroup_2);
app.NO3_2.Text = 'NO3';
app.NO3_2.Position = [294 10 58 22];

% Create PT_2
app.PT_2 = uitogglebutton(app.ButtonGroup_2);
app.PT_2.Text = 'PT';
app.PT_2.Position = [357 10 58 22];

% Create graficoscalibracion
app.graficoscalibracion = uibutton(app.CalibracionModeloTab,
'push');
app.graficoscalibracion.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@graficoscalibracionButtonPushed, true);
app.graficoscalibracion.Position = [194 358 100 22];
app.graficoscalibracion.Text = 'Generar';

% Create Info2
app.Info2 = uibutton(app.CalibracionModeloTab, 'push');
app.Info2.BackgroundColor = [0.0353 0.5725 0.9294];
app.Info2.FontWeight = 'bold';
app.Info2.Position = [1018 536 17 22];
app.Info2.Text = 'i';

% Show the figure after all components are created
app.HumePUCP.Visible = 'on';
end
end

% App creation and deletion
methods (Access = public)

% Construct app
function app = HUMEPUCPv4_exported

% Create UIFigure and components
createComponents(app)

% Register the app with App Designer
registerApp(app, app.HumePUCP)

% Execute the startup function
runStartupFcn(app, @startupFcn)

if nargin == 0
clear app
end
end

% Code that executes before app deletion
function delete(app)

% Delete UIFigure when app is deleted
delete(app.HumePUCP)
end
end
end
end

```

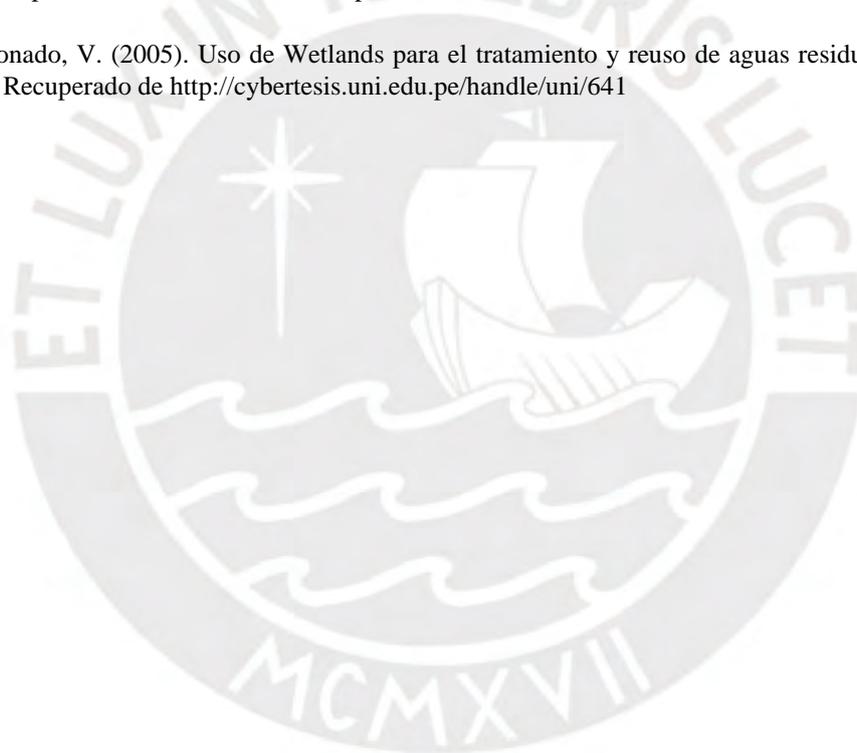
## FUENTES CITADAS

Read Microsoft Excel spreadsheet file - MATLAB xlsread. (s. f.). Recuperado 23 de junio de 2020, de <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/xlsread.html>

Convert cell array to ordinary array of the underlying data type - MATLAB cell2mat. (s. f.). Recuperado 23 de junio de 2020, de <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/cell2mat.html>

Create table from file - MATLAB readtable. (s. f.). Recuperado 23 de junio de 2020, de <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/readtable.html>

Maldonado, V. (2005). Uso de Wetlands para el tratamiento y reuso de aguas residuales domésticas. Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/641>



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARAMÉTRICO PARA EL  
DISEÑO EFICIENTE DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE  
FLUJO SUPERFICIAL A TRAVÉS DEL SOFTWARE MATLAB**

**ANEXO II: DEL TRABAJO EN CAMPO**

**AUTOR:**

**Raúl Sebastian Acuña Letona**

**ASESOR:**

**Federico Alexis Dueñas Dávila, PhD.**

Diciembre 2020



## TABLA DE CONTENIDOS

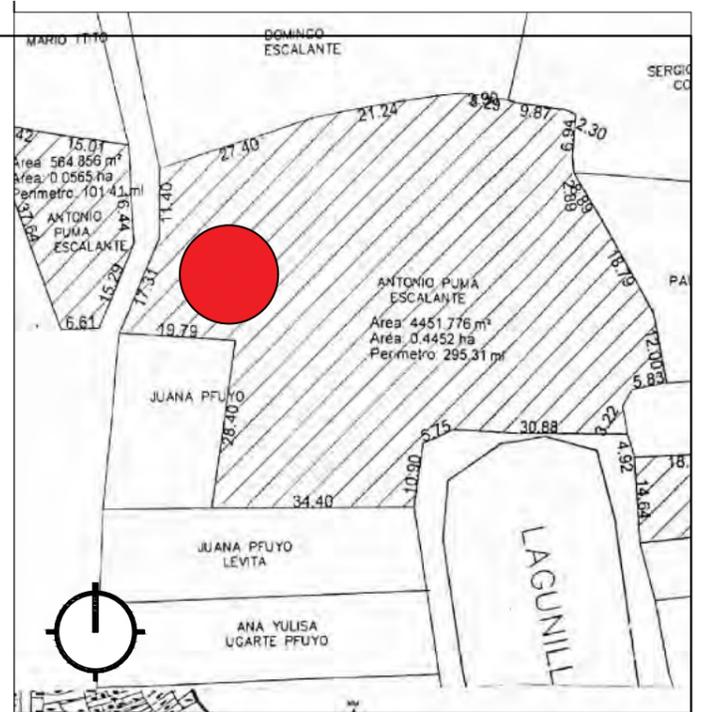
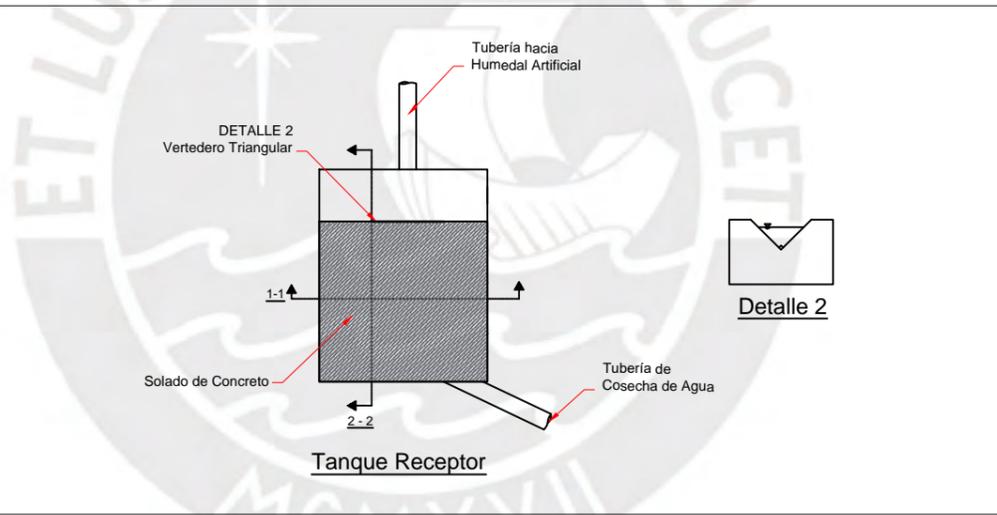
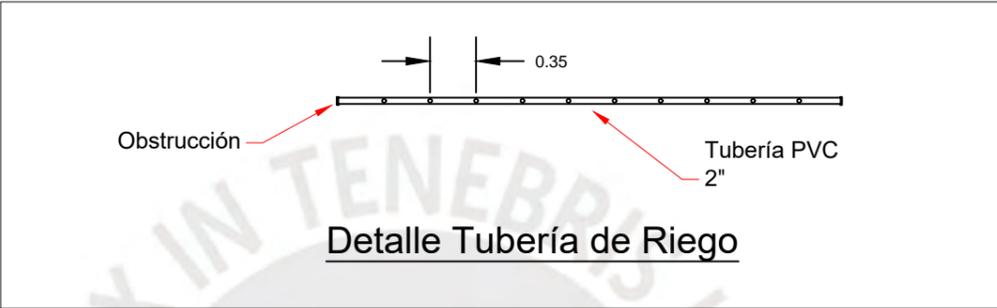
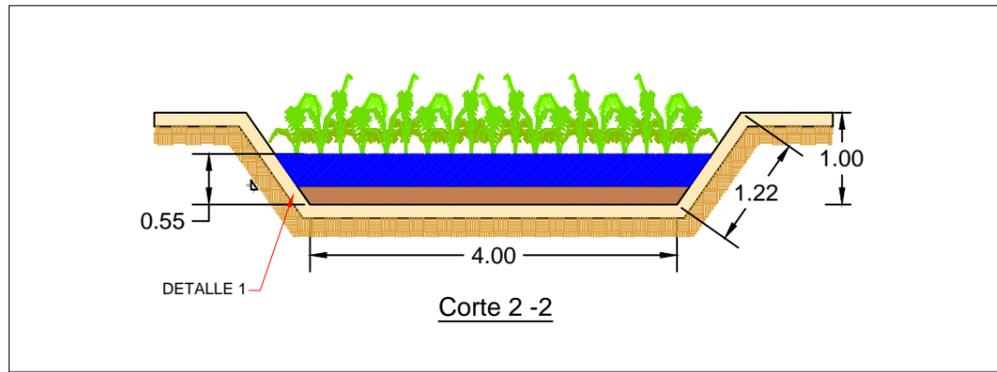
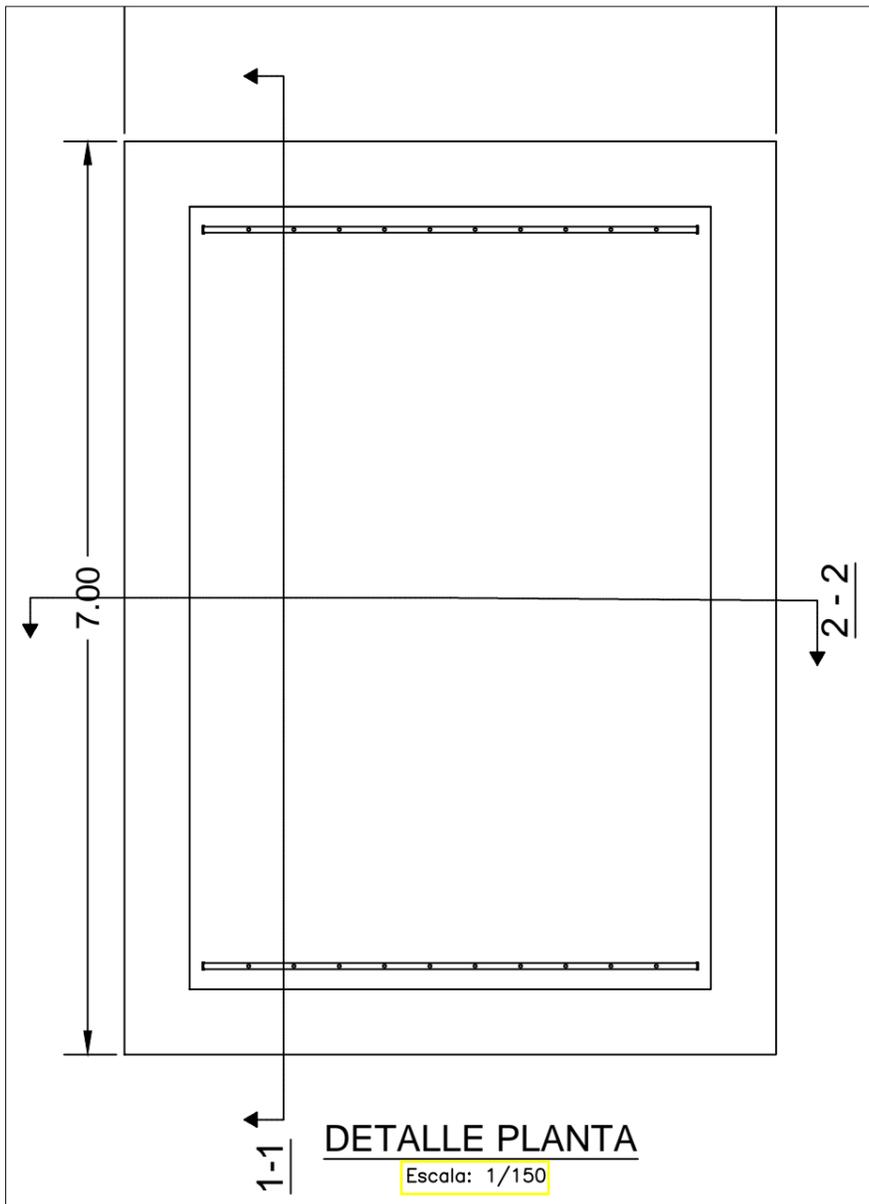
1. ANEXO 1: PLANOS DE DISEÑO HUMEDAL CHINCHEROS.....	1
2. ANEXO 2: MUESTRAS DE LABORATORIO: SITUACIÓN DE LAS AGUAS A TRATAR.....	4
3. ANEXO 3. PRESUPUESTO FINAL HUMEDAL CHINCHERO .....	7
4. ANEXO 4. SEGUIMIENTO DATOS HUMEDAL – SINERGIA INGENIERÍA .....	20



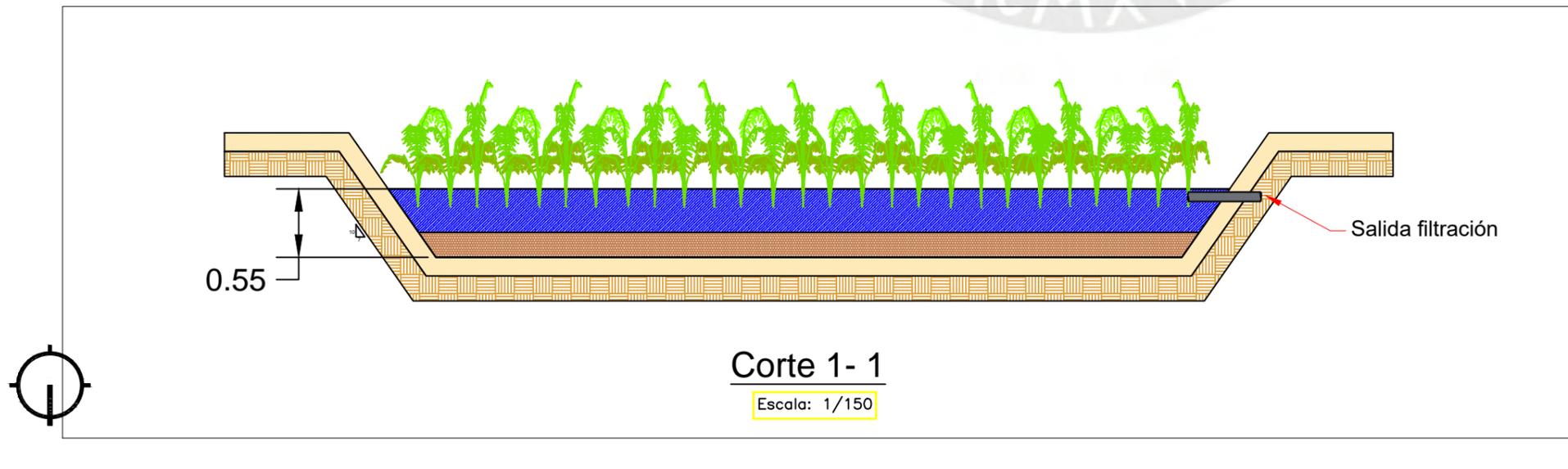
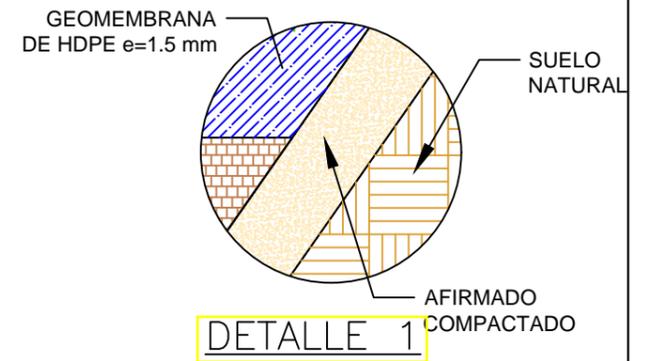
## 1. ANEXO 1: PLANOS DE DISEÑO HUMEDAL CHINCHEROS

Una vez proyectado el humedal en gabinete, se designan las dimensiones finales y espacios a emplear para la construcción del humedal en campo.





PLANO DE LOCALIZACIÓN - ESC: 1 / 2000  
Departamento de Cusco, Provincia de Urubamba  
Distrito de Chincheros

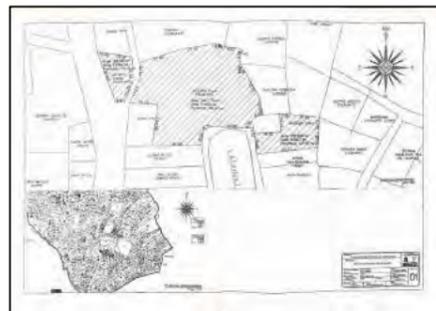


**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIDAD DE INGENIERÍA CIVIL

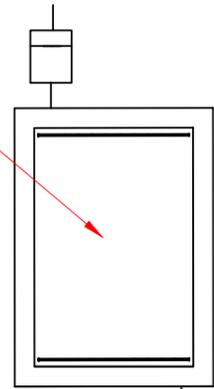
Proyecto de Investigación:  
**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARAMÉTRICA PARA EL DISEÑO EFICIENTE DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUPERFICIAL A TRAVÉS DEL SOFTWARE MATLAB**

Plano: Detalles constructivos Humedal Artificial	Escala:	Fecha: MARZO 2019
Asesor: Ing. Alexis Dueñas, PhD.	Tesista: Raúl Acuña Letona	Plano N°: <b>H - 01</b>

# Humedal Artificial



Vertedero Triangular SALIDA



Vertedero Triangular ENTRADA



TUBERÍA PVC 3"

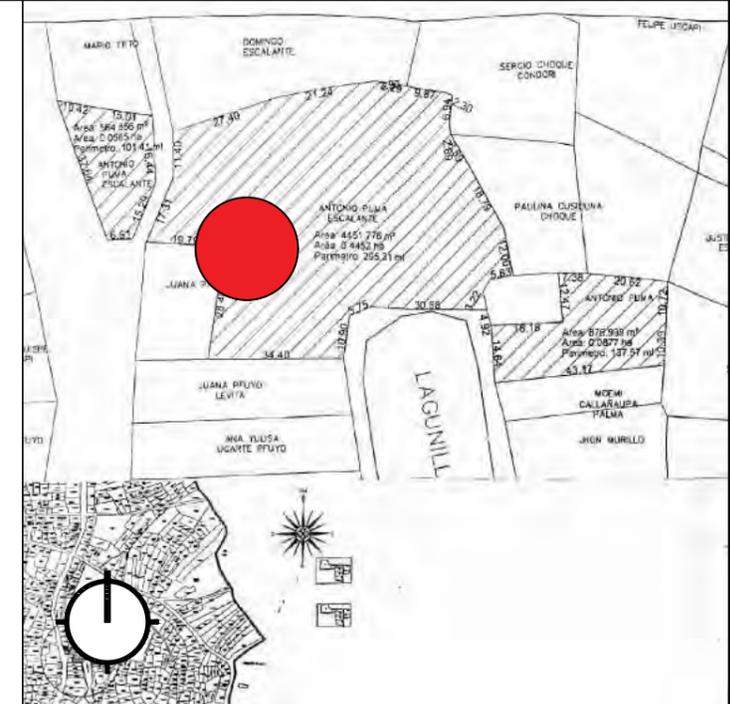
LLAVE MANUAL



ÁREA VERDE



PROPIEDAD ANTONIO QUISPE



PLANO DE LOCALIZACIÓN - ESC: 1 / 2000  
 Departamento de Cusco, Provincia de Urubamba  
 Distrito de Chincheros

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
 ESPECIALIDAD DE INGENIERÍA CIVIL



Proyecto de Investigación:  
 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARAMÉTRICA PARA EL DISEÑO EFICIENTE DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUPERFICIAL A TRAVÉS DEL SOFTWARE MATLAB

Plano: UBICACIÓN GENERAL	Escala: 1/200	Fecha: MARZO 2019
Asesor: Ing. Alexis Dueñas, PhD.	Tesista: Raúl Acuña Letona	Plano N°: H - 02

## **2. ANEXO 2: MUESTRAS DE LABORATORIO: SITUACIÓN PRIMARIA DE LAS AGUAS A TRATAR**

Se ha considerado el nivel de contaminante previo al empleo de un humedal artificial para la limpieza de este. Las muestras de laboratorio hechas a la muestra inicial son como se muestran a continuación:



**INFORME DE ANÁLISIS N° 00402 FQF**

**SOLICITANTE:** RAUL ACUÑA LETON

**MUESTRA:** AGUA DE LAGUNA

Departamento: Cusco

Provincia: Urubamba

Distrito: Chinchero

Punto de muestreo: agua del medio de la laguna

**FECHA DE TOMA DE MUESTRA:** 30 de setiembre del 2018

**HORA:** 15: 00 PM

**RESULTADO DEL ANÁLISIS FISICOQUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES**

**MUESTRA N°02: AGUA DE LAGUNA ARTIFICIAL**

EXAMEN FISICOQUÍMICO	RESULTADO	LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS
pH	7.05	6,5 -8,5
Sólidos totales en suspensión (mL/L)	288.3	150.0
Temperatura (°C)	15.0	<35 °C

**COMENTARIO:** Conforme a los análisis fisicoquímicos, la muestra de agua se encuentra por encima de los límites máximos permisibles, de acuerdo al reglamento de Aguas Residuales Domesticas o Municipales D.S. N° 003-2010 – MINAM

Métodos Normalizados para análisis de agua potable y residuales (APHA-AWWA-WPCF)

Cusco, 06 de octubre del 2018



FAMILAB  
LABORATORIO DE ANÁLISIS CLÍNICO  
Univ. Andrés Bello  
BIOLÓGICA  
COLBIOP. 5806

**Calle San Andrés N° 240 2do. Piso - Of. A-202 Telf. 232410**

**Cel. 974 960006 - RPM \* 560066 - RPC 940 189193**

**E-mail: ofarsf@hotmail.com - Cusco - Perú**

**HORARIO DE ATENCIÓN:** Lun. a Vie. 8:00 a.m. a 8:00 p.m. Sábados: 8:00 a.m. a 6:00 p.m.

**INFORME DE ANÁLISIS N° 00402 LAMICRO**

**SOLICITANTE:** RAUL ACUÑA LETON

**MUESTRA:** AGUA DE LAGUNA

Departamento: Cusco

Provincia: Urubamba

Distrito: Chinchero

Punto de muestreo: agua del medio de la laguna

**FECHA DE TOMA DE MUESTRA:** 30 de setiembre del 2018

**HORA:** 15:00 PM

**RESULTADO DEL ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO DE AGUAS**

**MUESTRA N°01:** AGUA DE LAGUNA ARTIFICIAL

EXAMEN BACTERIOLÓGICO	RESULTADO	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS
COLIFORMES TERMOTOLERANTES (NMP/100 ml):	21x10 <sup>3</sup> NMP/100 mL	COLIFORMES TERMOTOLERANTES: 10,000 (NMP/100 mL)

**COMENTARIO:** Conforme a los análisis microbiológicos, la muestra de agua se encuentra por encima de los límites máximos permisibles, de acuerdo al reglamento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales D.S. N° 003-2010 – MINAM

Método de tubos múltiples

Métodos estandarizados según las normas de calidad de agua APHA SM 9221E

Y SM 9221B

Cusco, 06 de octubre del 2018



Jorge Choquenahua Pari  
C.Q.P. N° 914

Calle San Andrés N° 240 2do. Piso - Of. A-202 Telf. 232410

Cel. 974 960006 - RPM \* 560066 - RPC 940 189193

E-mail: ofarsf@hotmail.com - Cusco - Perú

HORARIO DE ATENCIÓN: Lun. a Vie. 8:00 a.m. a 8:00 p.m. Sábados: 8:00 a.m. a 6:00 p.m.

### 3.ANEXO 3. PRESUPUESTO FINAL HUMEDAL CHINCHERO

El trabajo ha sido integrante asumido por el tesista, a continuación se detallan los insumos.



# Resumen del Presupuesto

*Proyecto*      **PRESUPUESTO FINAL - HUMEDAL ARTIFICIAL  
CHINCHERO - TESIS PUCP**

*Cliente*        RAUL SEBASTIÁN ACUÑA LETONA

*Departamento*    CUSCO

*Provincia*        URUBAMBA

*Distrito*          CHINCHERO

*Costo a :*                              **Junio - 2019**

<i>Item</i>	<i>Descripción Sub presupuesto</i>	<i>Costo Directo</i>
01	PRESUPUESTO FINAL - HUMEDAL ARTIFICIAL CHINCHERO - TESIS PUCP	4,800.90
<b>SUB TOTAL COSTO DIRECTO</b>		<b>4,800.90</b>
	<b>Mano de Obra</b>	2,106.73
	<b>Materiales</b>	2,161.47
	<b>Equipo</b>	532.70
	<b>COSTO DIRECTO</b>	<b>4,800.90</b>
	<b>GASTOS GENERALES</b> 10 %	480.09
	<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>	<b>5,280.99</b>

**Son : CINCO MIL DOSCIENTOS OCHENTA CON 99/100 NUEVOS SOLES**

## Planilla de Sustento de Metrados

**Proyecto** PRESUPUESTO FINAL - HUMEDAL ARTIFICIAL CHINCHERO - TESIS PUCP  
**Sub Presupuesto** 01 - PRESUPUESTO FINAL - HUMEDAL ARTIFICIAL CHINCHERO - TESIS PUCP  
**Ciente** RAUL SEBASTIAN ACUÑA LETONA  
**Ubicación** CHINCHERO - URUBAMBA - CUSCO

Partida **01.01.01.01** TRAZO, NIVELES Y REPLANTEO PRELIMINAR **Total** : **14.00 M2**

Descripción	N Estr.	N Elem	Área	Largo	Ancho	Alto	Parcial
ÁREA HUMEDAL				3.50	4.00		14.00

Partida **02.01.01.01** EXCAVACION DE TIERRA EN MATERIAL SATURADO **Total** : **14.00 M3**

Descripción	N Estr.	N Elem	Área	Largo	Ancho	Alto	Parcial
VOLUMEN DE EXCAVACION EN MATERIAL SATURADO							
SATURADO	1			3.50	4.00	1.00	14.00

Partida **02.02.01** RELLENO COMPACTADO CON MATERIAL PROPIO **Total** : **2.80 m3**

Descripción	N Estr.	N Elem	Área	Largo	Ancho	Alto	Parcial
MEJORAMIENTO DE LA BASE DEL HUMEDAL	1			3.50	4.00	0.20	2.00

Partida **02.03.01** REFINE EN TALUD Y FONDO DEL CORTE EN CANALES, e= 0.10 mts. **Total** : **16.00 M**

Descripción	N Estr.	N Elem	Área	Largo	Ancho	Alto	Parcial
REFINE DEL CANAL TALUD Y FONDO	1			16.00			16.00

Partida **02.04.01** ELIMINACION DE MATERIAL EXCEDENTE D=1KM **Total** : **14.00 m3**

Descripción	N Estr.	N Elem	Área	Largo	Ancho	Alto	Parcial
MATERIAL EXCEDENTE	1			3.50	4.00	1.00	14.00

Partida **02.04.02** ACARREO MATERIAL DE EXCEDENTE **Total** : **14.00 M3**

Descripción	N Estr.	N Elem	Área	Largo	Ancho	Alto	Parcial
ACARREO DEL MATERIAL EXCEDENTE D = 50 MTS							
50 MTS	1			3.50	4.00	1.00	14.00

Partida **03.01.01.01** TUBO PVC DE 100 MM CON PERFORACIONES DE 1" *Total*  
: **3.00 M**

<i>Descripción</i>	<i>N Estr.</i>	<i>N Elem</i>	<i>Área</i>	<i>Largo</i>	<i>Ancho</i>	<i>Alto</i>	<i>Parcial</i>
TUBERIA CON PERFORACION DE 1"	1			3.00			3.00

Partida **03.01.01.02** TUBO PVC DE 100 MM CON UNION A CEMENTAR *Total*  
: **16.00 M**

<i>Descripción</i>	<i>N Estr.</i>	<i>N Elem</i>	<i>Área</i>	<i>Largo</i>	<i>Ancho</i>	<i>Alto</i>	<i>Parcial</i>
TUBERIA CON UNION	1			16.00			16.00

Partida **03.02.01.01** CAJA DE REGISTRO *Total*  
: **2.00 UND**

<i>Descripción</i>	<i>N Estr.</i>	<i>N Elem</i>	<i>Área</i>	<i>Largo</i>	<i>Ancho</i>	<i>Alto</i>	<i>Parcial</i>
		2					2.00

Partida **03.02.02.01** PRUEBAS HIDRAULICAS *Total*  
: **1.00 GLB**

<i>Descripción</i>	<i>N Estr.</i>	<i>N Elem</i>	<i>Área</i>	<i>Largo</i>	<i>Ancho</i>	<i>Alto</i>	<i>Parcial</i>
PRUEBA HIDRAULICA		1					1.00

# Presupuesto

**Proyecto** PRESUPUESTO FINAL - HUMEDAL ARTIFICIAL CHINCHERO - TESIS PUCP  
**Sub Presupuesto** **01 - PRESUPUESTO FINAL - HUMEDAL ARTIFICIAL CHINCHERO - TESIS PUCP**  
**Cliente** RAUL SEBASTIAN ACUÑA LETONA  
**Ubicación** CHINCHERO - URUBAMBA - CUSCO

Costo a :

Junio -  
2019

Item	Descripción	Unidad	Metrado	Precio	Parcial	Subtotal	Total
01	<u>OBRAS PROVISIONALES, SEGURIDAD Y SALUD.</u> <u>TRABAJOS PRELIMINARES</u>						18.40
01.01	TRABAJOS PRELIMINARES					18.40	
01.01.01	TRAZO, NIVELES Y REPLANTEO					18.40	
01.01.01.01	TRAZO, NIVELES Y REPLANTEO PRELIMINAR	M2	10.00	1.84	18.40		
02	<u>MOVIMIENTO DE TIERRAS</u>						1,411.84
02.01	EXCAVACIONES					440.00	
02.01.01	EXCAVACIONES SIMPLES					440.00	
02.01.01.01	EXCAVACION DE TIERRA EN MATERIAL SATURADO	M3	10.00	44.00	440.00		
02.02	RELLENOS					220.70	
02.02.01	RELLENO COMPACTADO CON MATERIAL PROPIO	m3	2.00	110.35	220.70		
02.03	NIVELACION INTERIOR Y APISONADO DE TERRENO					123.84	
02.03.01	REFINE EN TALUD Y FONDO DEL CORTE EN CANALES, e= 0.10 mts.	M	16.00	7.74	123.84		
02.04	ELIMINACIONES Y ACARREOS					627.30	
02.04.01	ELIMINACION DE MATERIAL EXCEDENTE D=1KM	m3	10.00	39.55	395.50		
02.04.02	ACARREO MATERIAL DE EXCEDENTE	M3	10.00	23.18	231.80		
03	<u>INSTALACIONES SANITARIAS</u>						2,381.07
03.01	DESAGUE Y VENTILACION					1,872.69	
03.01.01	REDES DE DERIVACION					1,872.69	
03.01.01.01	TUBO PVC DE 100 MM CON PERFORACIONES DE 1"	M	3.00	81.83	245.49		
03.01.01.02	TUBO PVC DE 100 MM CON UNION A CEMENTAR	M	16.00	101.70	1,627.20		
03.02	CAMARAS DE INSPECCION					508.38	
03.02.01	CAJAS DE REGISTRO					180.56	
03.02.01.01	CAJA DE REGISTRO	UND	2.00	90.28	180.56		
03.02.02	PRUEBA HIDRAULICA					327.82	
03.02.02.01	PRUEBAS HIDRAULICAS	GLB	1.00	327.82	327.82		

COSTO DIRECTO		3,811.31
GASTOS GENERALES	15 %	571.70
<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>		<b><u>4,383.01</u></b>

**Son : CUATRO MIL TRESCIENTOS OCHENTA Y TRES CON 01/100 NUEVOS SOLES**



## Análisis de Costos Unitarios

**Proyecto** PRESUPUESTO FINAL - HUMEDAL ARTIFICIAL CHINCHERO - TESIS PUCP  
**Sub Presupuesto** **01 - PRESUPUESTO FINAL - HUMEDAL ARTIFICIAL CHINCHERO - TESIS PUCP**  
**Cliente** RAUL SEBASTIAN ACUÑA LETONA  
**Ubicación** CHINCHERO - URUBAMBA - CUSCO

**Costo**  
**a :** **Junio - 2019**

Partida **01.01.01.01** TRAZO, NIVELES Y REPLANTEO PRELIMINAR Rend: 400.0000 M2/DIA

Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
	Mano de Obra					
47 00006	CAPATAZ	HH	0.200	0.0040	18.00	0.07
47 00086	TOPOGRAFO	HH	1.000	0.0200	18.00	0.36
47 00009	PEON	HH	0.500	0.0100	12.00	0.12
						0.55
	Materiales					
30 05732	CAL HIDRAULICA	BOL		0.0200	40.00	0.80
43 00020	MADERA TORNILLO TRATADA ESTRUCTURADA	P2		0.0300	4.00	0.12
						0.92
	Equipo					
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		1.0000	0.55	0.01
37 05733	WINCHA	UND		0.0020	30.00	0.06
48 04826	NIVEL DE INGENIERO	HM	1.000	0.0200	15.00	0.30
						0.37
<b>Costo Unitario por M2 :</b>						<b>1.84</b>

Partida **02.01.01.01** EXCAVACION DE TIERRA EN MATERIAL SATURADO Rend: 2.5000 M3/DIA

Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
	Mano de Obra					
47 00008	OFICIAL	HH	0.100	0.3200	13.50	4.32
47 00009	PEON	HH	1.000	3.2000	12.00	38.40
						42.72
	Equipo					
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	42.72	1.28
						1.28
<b>Costo Unitario por M3 :</b>						<b>44.00</b>

Partida **02.02.01** RELLENO COMPACTADO CON MATERIAL PROPIO Rend: 5.0000 m3/DIA

Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
	Mano de Obra					

47 00007	OPERARIO	HH	1.000	1.6000	15.00	24.00
47 00009	PEON	HH	3.000	4.8000	12.00	<u>57.60</u>
	Materiales					81.60
53 06209	PETROLEO DIESEL	gal		0.2000	11.50	<u>2.30</u>
	Equipo					2.30
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	81.60	2.45
49 06200	COMPACTADOR VIBRATORIO TIPO PLANCHA 4 HP	hm	1.000	1.6000	15.00	<u>24.00</u>
						26.45
						<b>Costo Unitario por m3 : 110.35</b>

Partida	<b>02.03.01</b>	REFINE EN TALUD Y FONDO DEL CORTE EN CANALES, e= 0.10 mts.		Rend:	80.0000 M/DIA	
<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
	Mano de Obra					
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0100	18.00	0.18
47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.1000	15.00	1.50
47 00009	PEON	HH	1.000	0.1000	12.00	<u>1.20</u>
						2.88
	Materiales					
04 00033	ARENA FINA	M3		0.0800	60.00	<u>4.80</u>
						4.80
	Equipo					
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		2.0000	2.88	<u>0.06</u>
						0.06
						<b>Costo Unitario por M : 7.74</b>

Partida	<b>02.04.01</b>	ELIMINACION DE MATERIAL EXCEDENTE D=1KM		Rend:	5.0000 m3/DIA	
<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
	Mano de Obra					
47 00009	PEON	HH	2.000	3.2000	12.00	<u>38.40</u>
						38.40
	Equipo					
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	38.40	<u>1.15</u>
						1.15
						<b>Costo Unitario por m3 : 39.55</b>

Partida **02.04.02** ACARREO MATERIAL DE EXCEDENTE Rend: 5.0000 M3/DIA

<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
	Mano de Obra					
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.1600	18.00	2.88
47 00009	PEON	HH	1.000	1.6000	12.00	19.20
						22.08
	Equipo					
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	22.08	1.10
						1.10
						<b>Costo Unitario por M3 : 23.18</b>

Partida **03.01.01.01** TUBO PVC DE 100 MM CON PERFORACIONES DE 1" Rend: 5.0000 M/DIA

<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
	Mano de Obra					
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.1600	18.00	2.88
47 00007	OPERARIO	HH	1.000	1.6000	15.00	24.00
47 00008	OFICIAL	HH	1.000	1.6000	13.50	21.60
						48.48
	Materiales					
30 04341	PEGAMENTO PARA PVC	GLN		0.0005	250.00	0.13
72 05277	CODO PVC-SAL 50 mm x 90°	UND		1.0000	7.80	7.80
72 05276	YEE PVC SAL 50 x 50 mm	UND		1.0000	8.00	8.00
73 05278	TUBERIA PVC SAL SP. 100 mm	M		1.0000	15.00	15.00
						30.93
	Equipo					
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	48.48	2.42
						2.42
						<b>Costo Unitario por M : 81.83</b>

Partida **03.01.01.02** TUBO PVC DE 100 MM CON UNION A CEMENTAR Rend: 5.0000 M/DIA

<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
	Mano de Obra					
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.1600	18.00	2.88
47 00007	OPERARIO	HH	1.000	1.6000	15.00	24.00
47 00008	OFICIAL	HH	1.000	1.6000	13.50	21.60
						48.48
	Materiales					
30 01884	UNION DE TUBERIAS (Inc. Accesorios)	UND		1.0000	20.00	20.00

72 05277	CODO PVC-SAL 50 mm x 90°	UND	1.0000	7.80	7.80
72 05276	YEE PVC SAL 50 x 50 mm	UND	1.0000	8.00	8.00
73 05278	TUBERIA PVC SAL SP. 100 mm	M	1.0000	15.00	15.00
					50.80
	Equipo				
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO	5.0000	48.48	2.42
					2.42
					<b>Costo Unitario por M : 101.70</b>

Partida **03.02.01.01** CAJA DE REGISTRO Rend: 4.0000 UND/DIA

<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
	Mano de Obra					
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.2000	18.00	3.60
47 00007	OPERARIO	HH	1.000	2.0000	15.00	30.00
47 00009	PEON	HH	1.000	2.0000	12.00	24.00
						57.60
	Materiales					
04 00033	ARENA FINA	M3		0.0200	60.00	1.20
21 00003	CEMENTO PORTLAND TIPO IP (42.5KG)	BOL		0.5000	23.50	11.75
31 03786	CAJA DE CONCRETO C/TAPA P/REGISTRO	UND		1.0000	18.00	18.00
						30.95
	Equipo					
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	57.60	1.73
						1.73
						<b>Costo Unitario por UND : 90.28</b>

Partida **03.02.02.01** PRUEBAS HIDRAULICAS Rend: 1.0000 GLB/DIA

<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
	Mano de Obra					
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.8000	18.00	14.40
47 00007	OPERARIO	HH	1.000	8.0000	15.00	120.00
47 00008	OFICIAL	HH	0.500	4.0000	13.50	54.00
						188.40
	Materiales					
39 00040	AGUA	M3		5.0000	1.00	5.00
39 01644	HIPOCLORITO DE CALCIO AL 70%	KG		5.0000	17.00	85.00
						90.00
	Equipo					

37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO	5.0000	188.40	9.42
48 02644	BOMBA MANUAL PARA PRUEBA DE TUBERIA	HM	0.500	4.0000	10.00
					49.42
					<b>Costo Unitario por GLB : 327.82</b>

---



## Listado de Insumos

**Proyecto** PRESUPUESTO FINAL - HUMEDAL ARTIFICIAL CHINCHERO - TESIS PUCP  
**Sub Presupuesto** **01 - PRESUPUESTO FINAL - HUMEDAL ARTIFICIAL CHINCHERO - TESIS PUCP**  
**Cliente** RAUL SEBASTIAN ACUÑA LETONA  
**Ubicación** CHINCHERO - URUBAMBA - CUSCO

Costo a :

**Junio -2019**

IU Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Parcial
<u>MANO DE OBRA</u>					
47 00006	CAPATAZ	HH	6.04	18.00	108.72
47 00086	TOPOGRAFO	HH	0.20	18.00	3.60
47 00007	OPERARIO	HH	47.20	15.00	708.00
47 00008	OFICIAL	HH	37.60	13.50	507.60
47 00009	PEON	HH	95.30	12.00	1,143.60
					2,471.52
<u>MATERIALES</u>					
04 00033	ARENA FINA	M3	1.32	60.00	79.20
21 00003	CEMENTO PORTLAND TIPO IP (42.5KG)	BOL	1.00	23.50	23.50
30 05732	CAL HIDRAULICA	BOL	0.20	40.00	8.00
30 04341	PEGAMENTO PARA PVC	GLN	0.002	250.00	0.50
30 01884	UNION DE TUBERIAS (Inc. Accesorios)	UND	16.00	20.00	320.00
31 03786	CAJA DE CONCRETO C/TAPA P/REGISTRO	UND	2.00	18.00	36.00
39 00040	AGUA	M3	5.00	1.00	5.00
39 01644	HIPOCLORITO DE CALCIO AL 70%	KG	5.00	17.00	85.00
43 00020	MADERA TORNILLO TRATADA ESTRUCTURADA	P2	0.30	4.00	1.20
53 06209	PETROLEO DIESEL	gal	0.40	11.50	4.60
72 05277	CODO PVC-SAL 50 mm x 90°	UND	19.00	7.80	148.20
72 05276	YEE PVC SAL 50 x 50 mm	UND	19.00	8.00	152.00
73 05278	TUBERIA PVC SAL SP. 100 mm	M	19.00	15.00	285.00
					1,148.20
<u>EQUIPO</u>					
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO			99.99
37 05733	WINCHA	UND	0.02	30.00	0.60
48 02644	BOMBA MANUAL PARA PRUEBA DE TUBERIA	HM	4.00	10.00	40.00
48 04826	NIVEL DE INGENIERO	HM	0.20	15.00	3.00
49 06200	COMPACTADOR VIBRATORIO TIPO PLANCHA 4 HP	hm	3.20	15.00	48.00
					191.59
<b>COSTO DIRECTO</b>					<b>3,811.31</b>
<b>GASTOS GENERALES</b>				15 %	<b>571.70</b>
<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>					<b>4,383.01</b>

**Son : CUATRO MIL TRESCIENTOS OCHENTA Y TRES CON 01/100 NUEVOS SOLES**

## *Desagregado de Gastos Generales*

*Proyecto* PRESUPUESTO FINAL - HUMEDAL ARTIFICIAL CHINCHERO - TESIS PUCP

*Cliente* RAUL SEBASTIAN ACUÑA LETONA

*Ubicación* CHINCHERO - URUBAMBA - CUSCO

*Costo a :*

**Junio - 2019**

---

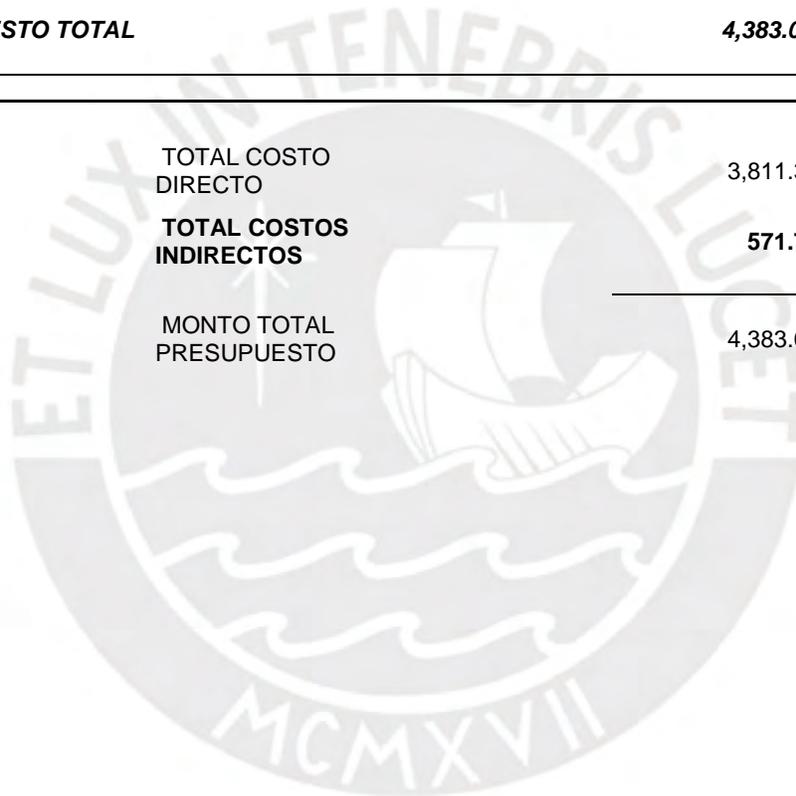
<b>COSTO DIRECTO</b>		<b>3,811.31</b>
<b>GASTOS GENERALES</b>	<b>15 %</b>	<b>571.70</b>
<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>		<b>4,383.01</b>

---

TOTAL COSTO DIRECTO 3,811.31

**TOTAL COSTOS INDIRECTOS 571.70**

MONTO TOTAL PRESUPUESTO 4,383.01



#### **4. ANEXO 4. SEGUIMIENTO DATOS HUMEDAL – SINERGIA INGENIERÍA**

Gracias al grupo SINGERGIA se ha hecho el seguimiento al humedal a lo largo del presente estudio. Se han contabilizado un total de 14 muestras de las fecha 15 de Junio al 04 de Setiembre del 2019.



Departamento de METROLOGIA

Proyecto : Humedal Artificial - CUSCO

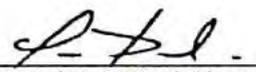
**Muestras de agua**

Parametro	Unidad	Muestra N°			
		10	11	12	13
pH	-	7.0	7.1	7.1	7.0
Coductividad	μS	220	217	227	240
TDS	ppm	111.2	108.4	113.5	120.6
Salinidad	psu	0.11	0.11	0.11	0.11
	ppt	0.03	0.02	0.03	0.04
Resistividad	kΩ	4.48	4.61	4.41	4.14
OD	%	14.7	16.3	18.2	18.2
T	°C	17.3			

MuestraN°	Descripción
10	Miercoles 04 de septiembre, salida
11	08 de septiembre, salida
12	04 de septiembre, salida
13	04 de septiembre, entrada

Setiembre 2019



  
MSc. Luis A. Defilippi Shinzato  
Físico Médico - C.F.P. 0418

Departamento de METROLOGIA

Proyecto : Humedal Artificial - CUSCO

Muestras de agua

Parametro	Unidad	Muestra N°			
		10	11	12	13
pH	-	7.0	7.1	7.1	7.0
Coductividad	μS	220	217	227	240
TDS	ppm	111.2	108.4	113.5	120.6
Salinidad	psu	0.11	0.11	0.11	0.11
	ppt	0.03	0.02	0.03	0.04
Resistividad	kΩ	4.48	4.61	4.41	4.14
OD	%	14.7	16.3	18.2	18.2
T	°C	17.3			

MuestraN°	Descripción
10	Miercoles 04 de septiembre, salida
11	08 de septiembre, salida
12	04 de septiembre, salida
13	04 de septiembre, entrada

Setiembre 2019



  
MSc. Luis A. Defilippi Shinzato  
Físico Médico - C.F.P. 0418

## Synergia Consultores Ambientales E.I.R.L.

Tipo de Análisis	FISICO QUIMICO
Elemento	AGUA
Ubicación	CUSCO

ENTRADA			
ANALISIS	15 DE JUNIO	29 DE JUNIO	01 DE JULIO
PH	7.6	7.6	7.6
CONDUCTIVIDAD	154.3 $\mu$ S	156.4 $\mu$ S	146 $\mu$ S
OXIGENO DISUELTO	26.30%	29.60%	33.70%
RESISTIVIDAD	6.7K $\Omega$	6.4K $\Omega$	6.9K $\Omega$
TDS	74.3ppm	77.9 ppm	73.2 ppm
SALINIDAD	0.07 psu	0.07psu	0.07 psu
	0.00 ppt	0.00 ppt	0.00 ppt

SALIDA			
ANALISIS	15 DE JUNIO	29 DE JUNIO	01 DE JULIO
PH	7.4	7.7	7.6
CONDUCTIVIDAD	146.8 $\mu$ S	154.6 $\mu$ S	162.2 $\mu$ S
OXIGENO DISUELTO	29.30%	40.60%	33.30%
RESISTIVIDAD	6.8K $\Omega$	6.5K $\Omega$	6.2K $\Omega$
TDS	73.0 ppm	76.4 ppm	79.7 ppm
SALINIDAD	0.07 psu	0.07 psu	0.08 psu
	0.00 ppt	0.00 ppt	0.00 ppt

Fecha : Julio 2019

## Synergia Consultores Ambientales E.I.R.L.

Tipo de Análisis	FISICO QUIMICO
Elemento	AGUA
Ubicación	CUSCO

ENTRADA			
ANALISIS	15 DE JUNIO	29 DE JUNIO	01 DE JULIO
PH	7.6	7.6	7.6
CONDUCTIVIDAD	154.3 $\mu$ S	156.4 $\mu$ S	146 $\mu$ S
OXIGENO DISUELTO	26.30%	29.60%	33.70%
RESISTIVIDAD	6.7K $\Omega$	6.4K $\Omega$	6.9K $\Omega$
TDS	74.3ppm	77.9 ppm	73.2 ppm
SALINIDAD	0.07 psu	0.07psu	0.07 psu
	0.00 ppt	0.00 ppt	0.00 ppt

SALIDA			
ANALISIS	15 DE JUNIO	29 DE JUNIO	01 DE JULIO
PH	7.4	7.7	7.6
CONDUCTIVIDAD	146.8 $\mu$ S	154.6 $\mu$ S	162.2 $\mu$ S
OXIGENO DISUELTO	29.30%	40.60%	33.30%
RESISTIVIDAD	6.8K $\Omega$	6.5K $\Omega$	6.2K $\Omega$
TDS	73.0 ppm	76.4 ppm	79.7 ppm
SALINIDAD	0.07 psu	0.07 psu	0.08 psu
	0.00 ppt	0.00 ppt	0.00 ppt

Fecha : Julio 2019

## Synergia Consultores Ambientales E.I.R.L.

Tipo de Análisis	FISICO QUIMICO
Elemento	AGUA
Ubicación	CUSCO

ENTRADA			
ANALISIS	15 DE JUNIO	29 DE JUNIO	01 DE JULIO
PH	7.6	7.6	7.6
CONDUCTIVIDAD	154.3 $\mu$ S	156.4 $\mu$ s	146 $\mu$ S
OXIGENO DISUELTO	26.30%	29.60%	33.70%
RESISTIVIDAD	6.7K $\Omega$	6.4K $\Omega$	6.9K $\Omega$
TDS	74.3ppm	77.9 ppm	73.2 ppm
SALINIDAD	0.07 psu	0.07psu	0.07 psu
	0.00 ppt	0.00 ppt	0.00 ppt

SALIDA			
ANALISIS	15 DE JUNIO	29 DE JUNIO	01 DE JULIO
PH	7.4	7.7	7.6
CONDUCTIVIDAD	146.8 $\mu$ S	154.6 $\mu$ S	162.2 $\mu$ S
OXIGENO DISUELTO	29.30%	40.60%	33.30%
RESISTIVIDAD	6.8K $\Omega$	6.5K $\Omega$	6.2K $\Omega$
TDS	73.0 ppm	76.4 ppm	79.7 ppm
SALINIDAD	0.07 psu	0.07 psu	0.08 psu
	0.00 ppt	0.00 ppt	0.00 ppt

Fecha : Julio 2019



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARAMÉTRICO PARA EL  
DISEÑO EFICIENTE DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE  
FLUJO SUPERFICIAL A TRAVÉS DEL SOFTWARE MATLAB**

**ANEXO III: COMPLEMENTARIO**

**AUTOR:**

**Raúl Sebastian Acuña Letona**

**ASESOR:**

**Federico Alexis Dueñas Dávila, PhD.**

Diciembre 2020



## TABLA DE CONTENIDOS

1. ANEXO 1: ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA - ASOCIACIÓN CIVILIZATE PUCP 1	
2. ANEXO 2: ENTREVISTA GRUPO GEMRA.....	2
3. ANEXO 3: TALLER DE INTRODUCCIÓN A MATLAB Y SUS APLICACIONES .....	3
FUENTES CITADAS .....	5



## **1. ANEXO 1: ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA - ASOCIACIÓN CIVILIZATE PUCP**

El trabajado de tesis ha figurado dentro de la publicación N°13 de la revista CIV – CIVILIZATE (CIVILIZATE, 2020). A continuación se adjuntan las portadas y extracto de artículo.



## 2. ANEXO 2: ENTREVISTA GRUPO GEMRA

Igualmnente, la fomentación y divulgación de temas sobre el medio ambiente y el agua ha figurado en la serie de entrevistas denominado **InfoGEMRA** del grupo GEMRA (Grupo de Estudiantes del Medio Ambiente y Recursos del Agua). Entrevista en la cual se discute el rol de los humedales naturales y artificiales así como una pequeña referencia al presente trabajo. La entrevista se ha colgado en la plataforma de YouTube. Link de acceso: <https://www.youtube.com/watch?v=AHgIfUy2naE&t=2s>



Figura 1. Entrevista del grupo GEMRA: “InfoGEMRA-Episodio 1: Humedales artificiales”



### 3. ANEXO 3: TALLER DE INTRODUCCIÓN A MATLAB Y SUS APLICACIONES



**GEMRA**  
24 de junio a las 15:00 · 🌐

[CUPOS AGOTADOS]

Estimada familia GEMRA ❤️  
Hemos organizado para ustedes este taller de Matlab, el cual se realizará este sábado 27 de junio a las 5pm. ¡No se pierdan esta gran oportunidad! 🌟🎉

📌 Les dejamos el link de inscripción aquí:  
<https://forms.gle/E16kjuSqeZRjrxu8>

---

**TALLER DE MATLAB**

 27 de junio  
5:00 PM  
Plataforma Zoom



**DICTADO POR:** Raúl S. Acuña Letona

  
Bachiller en Ingeniería civil. Antiguo miembro de GEMRA. Asistente de docencia y jefe de laboratorio en Evaluación y Gestión de Impactos Ambientales. Economía Ecológica y Sostenible en FACI.

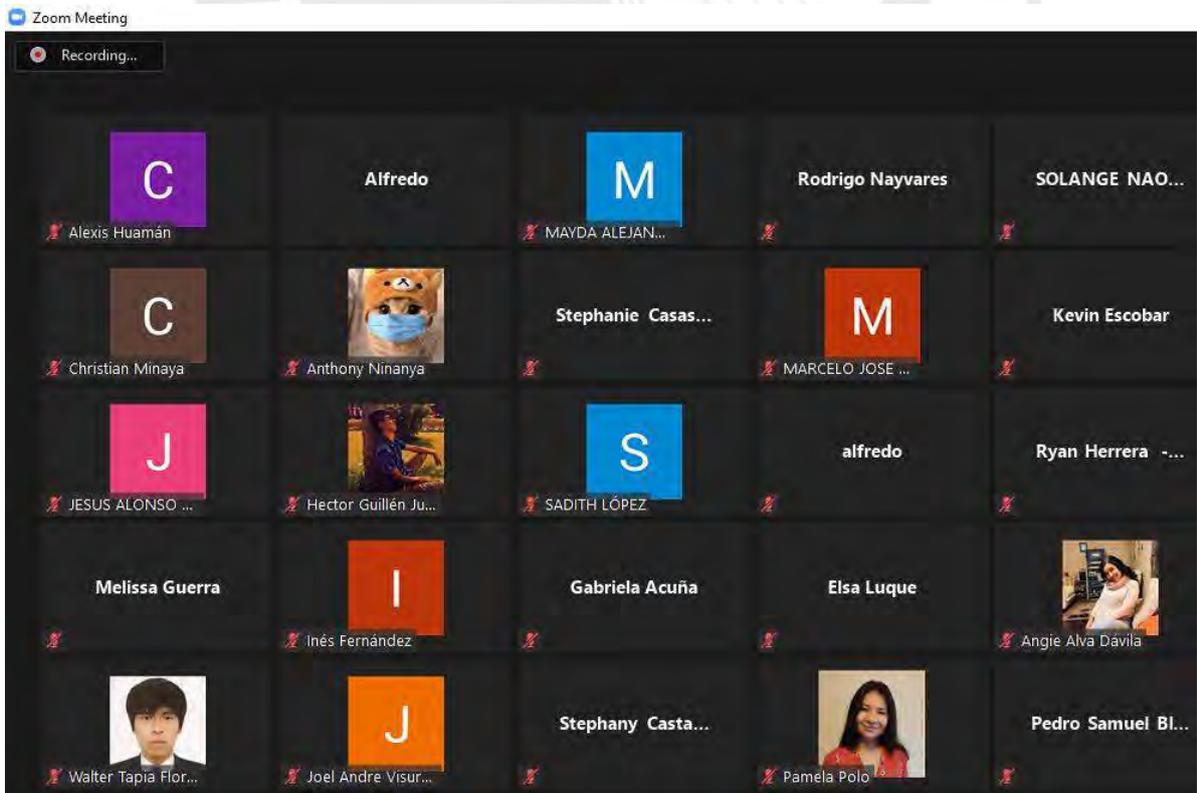
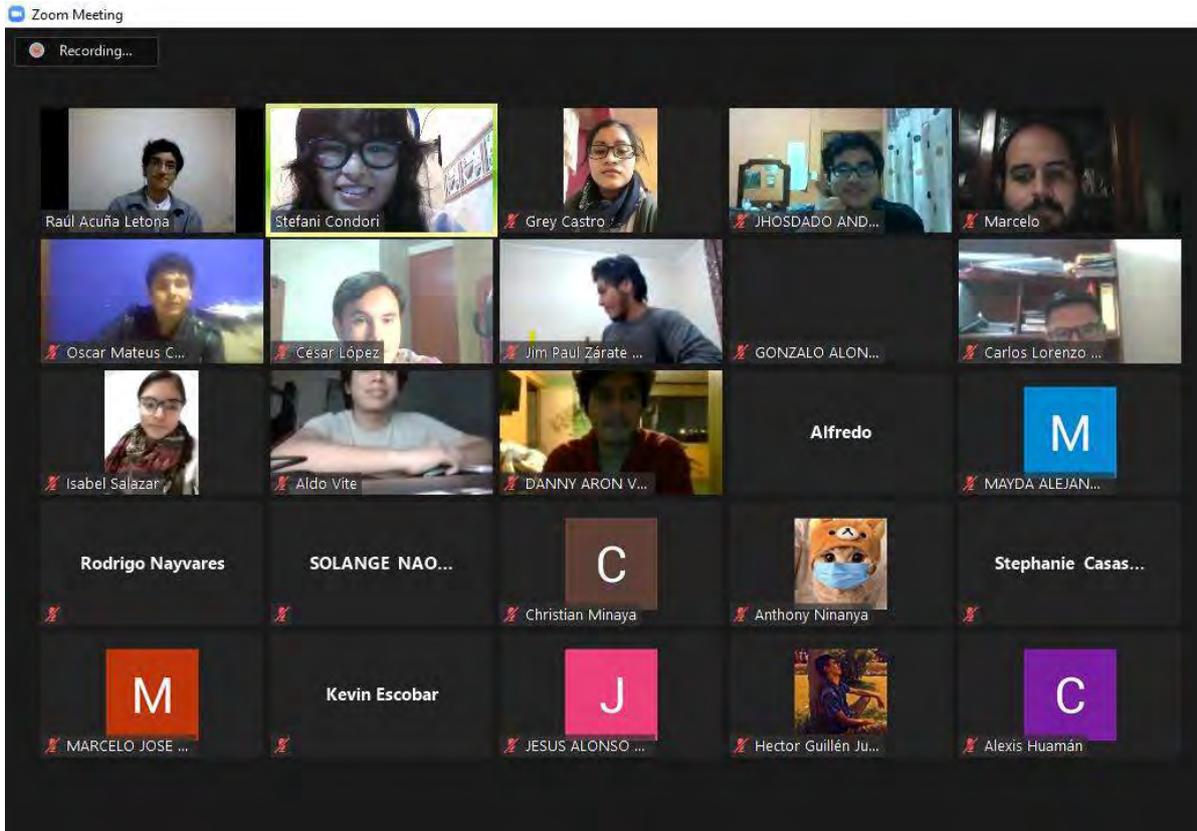
Desarrolló un aplicativo denominado HumePUCP en MATLAB para el diseño de humedales artificiales como parte de su tesis de bachillerato.


---

👍❤️👏 79      9 comentarios 13 veces compartido

👍 Me gusta      💬 Comentar      ➦ Compartir      🌐



## FUENTES CITADAS

CIVILIZATE, R. (2020). CIV - REVISTA CIVILIZATE. *CIVILIZATE*, 13.

