



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

***“DESARROLLO DE SISTEMA DE SOPORTE DE DECISIONES PARA  
EL DISEÑO DEL PRETRATAMIENTO EN UNA PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ASISTIDO POR WEB”***

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:**

**BRANDON CERECEDA SILVA**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. CARLOS ROBERTO FONSECA ORTIZ**

**TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO**

**MAYO 2018**



C. BRANDON CERECEDA SILVA  
PASANTES DE INGENIERÍA CIVIL  
PRESENTE.

En respuesta a su solicitud, a continuación transcribo el tema aprobado por esta Dirección, que propuso el **DR. CARLOS ROBERTO FONSECA ORTIZ**, con el fin de que lo desarrolle en la modalidad de **TESIS** le informo que se autoriza la impresión de su trabajo para presentar su Evaluación Profesional.

**"DESARROLLO DE SISTEMA DE SOPORTE DE DECISIONES PARA EL DISEÑO DEL PRETRATAMIENTO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ASISTIDO POR WEB."**

RESUMEN

- I. INTRODUCCIÓN
- II. MARCO TEÓRICO
- III. METODOLOGÍA
- IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN
- V. CONCLUSIONES
- VI. REFERENCIAS
- VII. ANEXOS

Ruego a usted tomar nota de que en cumplimiento a lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses, como requisito indispensable para sustentar su Evaluación Profesional.

Así mismo, para la elaboración de la **TESIS** y demás trámites, deberá sujetarse a la reglamentación respectiva de esta Universidad.



**ATENTAMENTE**  
**PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO**

"2018, Año del 190 Aniversario de la Universidad Autónoma del Estado de México".

FACULTAD DE INGENIERÍA  
U. A. E. M. X.

**DRA. MARÍA DOLORES DURÁN GARCÍA**  
**DIRECTORA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

\*\*/Saha

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi Alma Mater, Universidad Autónoma del Estado de México, por ser la casa de estudios que me brindo la formación y educación para ser un profesionalista.

A mis profesores de la facultad de ingeniería, por su tiempo y dedicación para enseñarme a ser un gran profesionalista en el ámbito de la ingeniería civil.

Al apoyo brindado, por parte de la Secretaria de Educación Pública por medio del proyecto 4457/2017CAP.

A mis padres, por todo el apoyo que me han brindado todo el apoyo moral, emocional, económico y sobre todo por darme todo su amor.

A mis abuelitos, por siempre mostrarme su cariño y enseñarme la relevancia de realizar las cosas de la mejor forma

A los doctores Carlos Roberto Fonseca Ortiz, Daury García Pulido, Ivan Gallego Alarcón, por la atención y apoyo brindado para la realización de este trabajo.

A mi amigo Edgar Espinoza Betancourt, por ser un gran compañero durante la carrera y por ser un gran amigo.

A Emanuel Segura Quiroz que me apoyó con la orientación y conocimientos de programación para la realización de este proyecto, Además de ser una gran persona con su trato tan amable.

## **DEDICATORIAS**

A mi alma mater, la Universidad Autónoma del Estado de México

A mi madre, mi padre, mis abuelitos y mis familiares con mucho cariño.

# INDICE

LISTA DE TABLAS.....	
LISTA DE FIGURAS.....	
RESUMEN.....	
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3. HIPÓTESIS.....	4
1.4. OBJETIVOS .....	4
II. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. Aguas Residuales.....	4
2.2. Características de las aguas residuales. ....	6
2.3. Tratamiento de aguas residuales .....	6
2.4. Cálculo de la población de proyecto .....	7
2.5. Estimación de caudales de aguas residuales a partir de los datos de abastecimiento de agua	8
2.6. Diseño del canal de control de velocidades.....	10
2.7. Diseño de la caja de control de caudales .....	11
2.8. Diseño de cribado.....	13
2.9. Diseño del desarenador .....	16
2.10. Diseño de la estructura aforadora .....	20
2.11. Sistema de soporte de decisiones.....	20
III. METODOLOGÍA.....	22
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
Interpretación de los resultados .....	45
V. CONCLUSIONES .....	47
Recomendaciones .....	47
VI. REFERENCIAS.....	49
VII. ANEXOS .....	51

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Simuladores existentes para el diseño y simulación de plantas de tratamiento de agua residual. (Sánchez <i>et al</i> ; 2015) .....	1
Tabla 2. Ventajas de regulación de caudal y homogenización.....	11
Tabla 3. Información típica para cribado. ....	13
Tabla 4. Criterios de diseño para desarenadores horizontales.....	18
Tabla 5. Información típica para desarenadores aireados.....	19
Tabla 6. Inputs y outputs de los procesos del pretratamiento de una PTAR.....	23
Tabla 7. Caso de estudio utilizando el SSD.....	39

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Canal de control de velocidades..	10
Figura 2. Sección rectangular.	11
Figura 3. Caja de control de caudales.	12
Figura 4. Cribado con reja o rejilla.	14
Figura 5. Variables de diseño.	16
Figura 6. Desarenador de flujo horizontal.	17
Figura 7. Desarenador aireado.	17
Figura 8. Metodología para el desarrollo de una aplicación web para el diseño de una PTAR.	22
Figura 9. Modelo conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales.	27
Figura 10. Modelo de variables para el pretratamiento y su interrelación.	29
Figura 11. Diagrama de interacción.	31
Figura 12. Diagrama de clases.	33
Figura 13. Diagrama de secuencia.	34
Figura 14. Interfaz de la aplicación, menú principal.	35
Figura 15. Introducción al DAW PTAR.	35
Figura 16. Tutorial de uso de la aplicación.	36
Figura 17. Información acerca de la aplicación, desarrolladores y bibliografía empleada.	36
Figura 18. Selección de la fase de tratamiento de diseñar.	37
Figura 19. Fase de pretratamiento.	37
Figura 20. Diseño por pasos.	38
Figura 21. Datos entrada requeridos y datos de salida.	38
Figura 22. Botones de información que dan soporte a las decisiones del usuario.	38
Figura 23. Casilla de ingreso de información con botones que aumentan o disminuyen el valor.	39
Figura 24. Casillas de validación de criterios.	39
Figura 25. Información ofrecida por SSD.	44
Figura 26. Alternativas de diseño del SSD.	44
Figura 27. Diagrama de elementos de diseño en cada proceso del SSD.	45

## RESUMEN

### ***DESARROLLO DE SISTEMA DE SOPORTE DE DECISIONES PARA EL DISEÑO DEL PRETRATAMIENTO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ASISTIDO POR WEB***

Brandon Cereceda Silva. Ingeniero Civil. Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ingeniería.

Asesores: <sup>1</sup>Dr. Carlos Roberto Fonseca Ortiz <sup>2</sup> Dr. Daury García Pulido <sup>3</sup>Dr. Ivan Gallego Alarcón

1. Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA). Ixtlahuaca de Rayón - Toluca, Estado de México Municipio. de Toluca, Méx. Código Postal 50200. Tel. 722-616-8727. crfonsecao@uaemex.mx

2. Universidad Autónoma del Estado de México. Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA). Ixtlahuaca de Rayón - Toluca, Estado de México Municipio. de Toluca, Méx. Código Postal 50200. dgarcia@uaemex.mx

3. Universidad Autónoma del Estado de México. Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA). Ixtlahuaca de Rayón - Toluca, Estado de México Municipio. de Toluca, Méx. Código Postal 50200. iga@uaemex.mx

Un sistema de soporte de decisiones (SSD), es un sistema de información computarizado interactivo, flexible y adaptable que utiliza reglas de decisión, modelos y base de modelos junto con una base de datos integral y las propias ideas del tomador de decisiones, que llevan a decisiones específicas e implementables para resolver problemas. Ante la creciente demanda de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), se vuelve necesaria la disposición de herramientas accesibles tanto técnica como económicamente. Mientras que la evolución del internet parece ofrecer el mayor acceso a la información a nivel mundial, el desarrollo de tecnología propia permite reducir los costos de diseño de PTAR. Este SSD está orientado al diseño del pretratamiento de una PTAR para aumentar la accesibilidad, a través de la implementación de un Diseño Asistido por Web (DAW).

El SSD ayudó en la selección de inputs (entrada de datos para el funcionamiento del SSD), donde se acompañan de la información necesaria para dar soporte a la decisión de los usuarios. Además, los outputs (salida de información del SSD) trabajan en tiempo real, gracias a JavaScript y HTML.

**Palabras clave:** sistema de soporte de decisiones, plantas de tratamiento de aguas residuales, diseño asistido por web

## ABSTRACT

### ***DESARROLLO DE SISTEMA DE SOPORTE DE DECISIONES PARA EL DISEÑO DEL PRETRATAMIENTO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ASISTIDO POR WEB***

Brandon Cereceda Silva. Ingeniero Civil. Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ingeniería.

Asesores: <sup>1</sup>Dr. Carlos Roberto Fonseca Ortiz <sup>2</sup> Dr. Daury García Pulido <sup>3</sup>Dr. Ivan Gallego Alarcón

1. Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA). Ixtlahuaca de Rayón - Toluca, Estado de México Municipio. de Toluca, Méx. Código Postal 50200. Tel. 722-616-8727. crfonsecao@uaemex.mx
2. Universidad Autónoma del Estado de México. Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA). Ixtlahuaca de Rayón - Toluca, Estado de México Municipio. de Toluca, Méx. Código Postal 50200. dgarcia@uaemex.mx
3. Universidad Autónoma del Estado de México. Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA). Ixtlahuaca de Rayón - Toluca, Estado de México Municipio. de Toluca, Méx. Código Postal 50200. iga@uaemex.mx

A decision support system (DSS), is an interactive, flexible and adaptable computerized information system that uses decision rules, model and model base along with a comprehensive database and the decision maker's own ideas, which lead to specific and implementable decisions to solve problems. In view of the growing demand for wastewater treatment plants (WWTP), the disposal of tools for wastewater treatment is needed. While the evolution of the Internet seems to offer access to information worldwide, the development of own technology decreases the costs of designing WWTP. This DSS is oriented to the design of the pretreatment of a WWTP to increase the accessibility, through the implementation of a Web Assisted Design (WAD).

The DSS helped in the selection of inputs (SSD), where it is accompanied by the necessary information to support the decision of the users. In addition, the results (information output from the DSS) work in real time, thanks to JavaScript and HTML.

**Keywords:** decision support system, wastewater treatment plants, web-assisted design.

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. ANTECEDENTES

En el contexto del suministro de agua, el vertido cero de efluentes debería ser el objetivo último de las empresas y las municipalidades. El vertido cero de efluentes implica el reciclado del agua y la recuperación de todos los residuos, evitando el vertido de sustancias contaminantes al medio ambiente acuático (UNESCO, 2006).

En caso de que el vertido cero no resulte ni técnica ni económicamente factible, existen diversas prácticas intermedias que se pueden aplicar para reducir el impacto sobre la calidad del agua, La selección de tecnologías óptimas para el tratamiento de las aguas residuales es una de estas prácticas (UNESCO, 2006).

**Tabla 1. Simuladores existentes para el diseño y simulación de plantas de tratamiento de agua residual. (Sánchez *et al*; 2015)**

Simulador	Creador	Origen
ASIM	EAWAG	Suiza
DESASS	Calagua group- UPV	España
BIOWIN	Envirosim Associates L.d	Canadá
EFOR	DHI.Inc	Dinamarca
GPS-X	Hydromantis Inc.	Canadá
SIMBA	IFAK-System Gmbh	Alemania
STOAT	WRc Group	Reino Unido
WEST	Hemmin N.V	Bélgica
EDAR 1.0	CEIT-Cadagua	España
AQUASIM	EAWAG	Suiza

Es posible encontrar desventajas en común en los paquetes comerciales. Por un lado, los considerables gastos para su adquisición pueden llegar a ser limitantes en países en desarrollo. Por otro lado, la mayoría de los paquetes requieren conocimientos avanzados para su manejo, además que pueden presentar una limitada accesibilidad al requerir la instalación de un paquete, que en algunos casos solo es compatible con ciertos sistemas operativos.

Una alternativa propuesta en este trabajo a estos paquetes comerciales es un sistema de soporte de decisiones (SSD), enfocado a aumentar la accesibilidad, a través de la implementación de un diseño asistido por Web (DAW). Este sistema, además, considera la facilidad de uso, al ofrecer alternativas en función de criterios de diseño.

Para su construcción, se considera la combinación de las dos metodologías principales de desarrollo de software (tradicionales y ágiles). Ambas ofrecen ventajas que se adoptan como parte de una metodología híbrida de desarrollo de software.

La primera, conocida como metodología de desarrollo tradicional, se basa en la rigurosa estructura de planeación y documentación de todos los procesos que se realizan. Estas características permiten que otros programadores puedan continuar un proyecto inconcluso o que se pueda ampliar o rediseñar el proyecto existente más fácilmente. Algunos ejemplos de Metodologías Tradicionales son: el RUP (Rational Unified Process, IBM, 2011) y el OMT (Object Modeling Technique; Rumbaugh et al., 1990 y Yourdon, 1976).

La segunda metodología es el desarrollo ágil de software. Esta metodología reduce los requerimientos de documentación a un mínimo. Los cambios en el proyecto se realizan directamente con el cliente o usuario y se procura la continua evolución del proyecto y la implementación de cambios de forma rápida. Ejemplos de esta metodología incluyen la programación XP (eXtreme Programming), Scrum y el Adaptive Software Development (ASD), (Dyba y Dingsøyr, 2016).

En una metodología híbrida de desarrollo, que combina principios de las dos metodologías anteriores, los requerimientos de documentación se hacen más flexibles respecto a los de la metodología tradicional, pero se mantiene una estructura razonable que permite que los cambios futuros en el software o en el personal sean más sencillos. Además, minimiza los errores en el software que se podrían producir al utilizar una metodología ágil.

De esta manera, el desarrollo de tecnología propia en el diseño de una PTAR, permitirá reducir costos de adquisición respecto a programas comerciales, ofrecer asistencia a usuarios que no cuenten con conocimientos avanzados en el área, así como una mejora en la accesibilidad ofrecida respecto a las alternativas disponibles actualmente.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

Ante el reto de una gestión integrada del agua y de garantizar su acceso como un derecho humano, los distintos sectores sociales no pueden permanecer indiferentes en un país en desarrollo como México. Nación donde el uso intensivo del agua se lleva a cabo en la zona con menor disponibilidad. La zona norte, centro y noroeste cuenta con menos de un tercio del agua renovable del país, pero se concentran más de las tres cuartas partes de la población (Cañez-Cota, 2015).

En México, alrededor de 12 millones de habitantes padecen una situación de crisis hídrica (FEA, 2006). En cuanto al acceso a saneamiento 24 millones habitantes carecen de alcantarillado.

Con el objeto de preservar la calidad del agua, se construyen plantas para tratar el agua antes de su descarga a los ríos y cuerpos de agua. De acuerdo con CONAGUA (2010), se recolectan en alcantarillado 1.78 millones de toneladas de  $\text{DBO}_5$  al año, de los cuales se remueve solo 36.5%. Por lo cual, es necesaria la construcción de más plantas de tratamiento en México.

En el 2010, las 2,186 plantas en operación en el país solo trataron  $93.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , es decir el 44.76% de los  $209.1 \text{ m}^3/\text{s}$  recolectados en los sistemas de alcantarillado (CONAGUA, 2012).

En una PTAR es inevitable la implementación de un pretratamiento, que cumpla con los siguientes objetivos: reducción de sólidos en suspensión de tamaños distintos que trae consigo un influente de aguas negras, evitar la obstrucción de los conductos, proteger los conductos y evitar sobrecargas hidráulicas en el sistema por causa de las aguas pluviales.

Ante la creciente demanda de PTAR, se vuelve necesaria la disposición de herramientas accesibles tanto técnica como económicamente. Mientras que la evolución del internet parece ofrecer el mayor acceso a la información a nivel mundial, el desarrollo de tecnología propia permite reducir los costos de diseño de PTAR.

En este sentido, el presente trabajo está enmarcado en el proyecto UAEM-CA-253 "Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales asistido por computadora con mejoramiento de procesos unitarios". Tiene la finalidad de desarrollar un Sistema de Soporte de Decisiones (SSD). Este SSD está orientado al diseño del pretratamiento de una PTAR para aumentar la accesibilidad, a través de la implementación de un Diseño Asistido por Web (DAW). De esta manera, por un lado, son evitados los problemas asociados a la instalación de un paquete informático de escritorio y, por otro lado, es

fomentado el desarrollo de tecnología propia para disminuir los costos asociados a la adquisición de paquetes comerciales.

### **1.3. HIPÓTESIS**

El desarrollo de un sistema de soporte de decisiones con acceso desde la web para la asistencia en el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales durante la etapa de pretratamiento, facilitará el acceso y la disposición de criterios de diseño, y permitirá reducir costos derivados de la adquisición de paquetes informáticos comerciales.

### **1.4. OBJETIVOS**

Objetivo general

- Desarrollar un Sistema de Soporte de Decisiones para la asistencia en el diseño del Pretratamiento de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales a través de la web.

Objetivos Específicos

- Construir un modelo conceptual de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, identificando las variables y su interrelación entre las mismas.
- Diseñar la arquitectura y el funcionamiento del Sistema de Soporte de Decisiones, siguiendo la ingeniería de requerimientos a través de la fase de mapeo y estrategias de alcance.
- Desarrollar las funciones y scripts necesarias asociadas al diseño de los procesos de Pretratamiento.
- Diseñar la interfaz del Sistema de Soporte de Decisiones para tener acceso por medio de web.
- Aplicar el Sistema de Soporte de Decisiones en un caso de estudio considerando una población de 16,948 habitantes y con un caudal  $.01177 \text{ m}^3/\text{s}$ , asociada a una localidad promedio del Estado de México.

## **II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Aguas Residuales**

El agua es un recurso indispensable para las actividades humanas y estas a su vez generan residuos sólidos como líquidos. La fracción líquida de los mismos (aguas residuales) es esencialmente el agua que se desprende una vez que ha sido contaminada durante los diferentes usos (domésticos, industriales, agrícolas, urbanas, pecuarias...) para los cuales ha sido empleada (Metcalf y Eddy, 1995).

Las aguas residuales se definen como aguas de composición variada provenientes de las descargas de uso público-urbano, doméstico, industrial, comercial, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas. Generalmente son conducidas a través de las redes de alcantarillado (CONAGUA, 2016).

Algunos autores (Pulido-García, 1999; Ramalho, 1990) mencionan que su composición puede variar significativamente de un caso a otro, por lo cual se recomienda que su tratamiento sea riguroso en función del contenido de las mismas. Para ello, una de las clasificaciones de aguas residuales más comunes (Ramalho, 1990; Zambrano-Pérez y Saltos-Arteaga, 2009) es:

- a) Domésticas: Son las aguas originadas en las viviendas o instalaciones comerciales. Están compuestas por aguas fecales y aguas de lavado y de limpieza. Los principales contaminantes que contienen son: gérmenes patógenos, materia orgánica, sólidos, nitrógeno y fósforo, además de otros de menor porción.
- b) Pecuarias: Son las que proceden de la actividad ganadera. Si la actividad se desarrolla de forma intensiva, se generan normalmente vertidos directos a los cauces. Los principales contaminantes son similares a los de las aguas residuales domésticas ya que proceden de animales de sangre caliente.
- c) Agrícola: Son las que proceden del arrastre, aguas de lluvia y el agua de riego, de los productos usados en la agricultura. Los principales contaminantes se pueden dividir en función de los compuestos utilizados como el abono o los pesticidas.
- d) Industriales: Proceden de la variada actividad industrial. Existen tantos tipos de aguas residuales industriales como tipos de industrias. El agua de abastecimiento se utiliza fundamentalmente como aguas de proceso, de limpieza, asimilables a domésticas y aguas de refrigeración y calefacción. Cada una de éstas va a generar las correspondientes aguas residuales, que reciben los mismos nombres. Se caracterizan por su variedad y por su variabilidad.
- e) Público-urbanas: Son provenientes de las precipitaciones de aguas de lluvia o nieve sobre la cuenca urbana. Sus principales características son: sólidos, agentes orgánicos, nitrógeno, fósforo, plomo y aceites. Son aportaciones de carácter intermitente.

## **2.2. Características de las aguas residuales.**

Las aguas residuales contienen material suspendido y componentes disueltos, tanto orgánicos como inorgánicos. Los constituyentes convencionales presentes en aguas residuales domésticas son (Metcalf y Eddy, 2003): sólidos suspendidos y coloidales, materia orgánica e inorgánica medida como demanda química y bioquímica de oxígeno (DQO y DBO, respectivamente), carbono orgánico total (COT), nitrógeno (amoniaco, orgánico, nitritos y nitratos), fósforo, bacterias, protozoarios y virus. Es importante conocer las características de las aguas residuales ya que de acuerdo con esto se escoge el tratamiento más adecuado para cada una de ellas.

Existen tres características fundamentales que son la base para los trenes de tratamiento. Estas características son: físicas, químicas y biológicas.

Las características físicas más importantes de las aguas residuales son: sólidos, turbiedad, color, olor, temperatura y conductividad.

Las características químicas más importantes de las aguas residuales se clasifican en inorgánicas y orgánicas. Y estas a su vez son: materia inorgánica, pH, cloruros, alcalinidad, nitrógeno, fósforo, sulfuro de hidrógeno, oxígeno disuelto, azufre, metales pesados y gases.

Las características biológicas más importantes de las aguas residuales son: microorganismos patógenos, que a su vez se clasifican en organismos eucariotas, bacterias y arqueobacterias.

## **2.3. Tratamiento de aguas residuales**

El tratamiento de las aguas residuales es relativamente reciente. Su inicio data de fines de 1800 y principios del actual siglo y coincide con la época de la higiene. Esto se desarrolló como consecuencia de la relación entre la contaminación de los cuerpos de agua y las enfermedades de origen hídrico (CONAGUA, 2016b).

El tratamiento tiene por objetivo la eliminación de la contaminación física, química y biológica, mediante diferentes procesos unitarios que son los métodos mediante los cuales se logra el objetivo. Estos procesos unitarios se agrupan para formar los trenes de tratamiento, conocidos como pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario.

El propósito del pretratamiento es remover, reducir o modificar constituyentes del agua residual que puedan causar problemas operacionales o incrementar el mantenimiento de los equipos

electromecánicos (CONAGUA, 2016b). Por tal motivo es práctica común y recomendada que se encuentren previos a los equipos de bombeo. Los constituyentes a remover en esta etapa consisten en sólidos gruesos, materiales inertes abrasivos, sólidos flotantes o grasas. El tratamiento primario está conformado por los procesos físicos o físico-químicos. Se realiza en tanques de sedimentación para remover parte de los contaminantes y retirarlos como lodo en el fondo de los tanques (García-Pulido, 1999). Este lodo después de ser procesado puede ser usado como abono (García-Pulido, 1999). El tratamiento secundario se refiere a todos los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales tanto aerobios como anaerobios (Ramalho, 1990) y el tratamiento terciario se refiere a todos los procesos de tratamiento químico (también conocido como tratamiento avanzado). Es la serie de procesos destinados a conseguir una calidad del efluente superior a la del tratamiento secundario convencional (Ramalho, 1990).

Dentro del pretratamiento algunos autores (Ramalho, 1990; CONAGUA, 2016b) proponen métodos como el cribado por medio de rejas y rejillas, el desarenado y la regulación de caudal.

Otros autores (García-Pulido., 1999; WEF, 2010; Metcalf y Eddy, 1995) consideran métodos como estimación de caudales de aguas residuales, un canal de control de velocidades, una caja de control de caudales, rejas y rejillas, estructura de aforo, desarenador, eliminación de grasas, tanque séptico y control de olores para el tanque séptico.

Por lo que las principales etapas para el diseño de pretratamiento incluyen: a) el cálculo de la población de diseño, b) estimación de caudales, c) diseño de mecanismos de control de velocidades y caudales, d) cribado, e) desarenador y; f) estructura aforadora

#### **2.4. Cálculo de la población de proyecto**

La población actual, se refiere, en el caso de México, a los datos censales que proporciona el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para el año en que se hizo el levantamiento de la información. Para los años posteriores al censo, se deberán utilizar los datos de las proyecciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO); que es la única dependencia facultada para hacer proyecciones de la población de México (CONAGUA, 2016a). Y la población de proyecto es la cantidad de personas que se espera tener en una localidad al final del período de diseño del sistema de agua potable y alcantarillado.

Las proyecciones de la población, estimadas por CONAPO están basadas en progresiones geométricas (ecuación 1). O bien, se utilizaron métodos de mínimos cuadrados (ecuación 2,3,4 y 5) con 4 tipos de regresiones.

$$LnP_p = LnP_{UC} + \frac{LnP_{UC} - LnP_{PC}}{T_{UC} - T_{PC}} (T_p \cdot T_{UC}) \quad (1)$$

Donde P<sub>P</sub>: Población proyecto, P<sub>UC</sub>: Población último censo, P<sub>PC</sub>: Población penúltimo censo, T<sub>P</sub>: Año futura población, T<sub>UC</sub>: Año último censo y T<sub>PC</sub>: Año penúltimo censo.

Regresión Lineal:  $Y = A + B \cdot X$  (2)

Regresión Exponencial:  $Y = A \cdot e^{BX}$  (3)

Regresión Logarítmica:  $Y = A \cdot \log(B \cdot X)$  (4)

Regresión Potencial:  $Y = A \cdot X^B$  (5)

Dónde Y: Es la población de proyecto, X: Es el año donde termina la vida útil, A y B: Constantes de regresión a obtener.

Para todo proyecto es necesario considerar la vida útil y periodo de diseño. Entonces la vida útil es el tiempo que se espera que la obra sirva para los propósitos de diseño, sin tener gastos de operación y mantenimiento elevados, que hagan antieconómico su uso o que requiera ser eliminada por insuficiente o ineficiente. Mientras que el periodo de diseño es el intervalo de tiempo en que la obra proyectada brindara servicio para el cual fue diseñado, es decir que operara con los parámetros utilizados para su dimensionamiento (población de proyecto, gasto de diseño, niveles de operación, etcétera). Para el caso de una planta de tratamiento el periodo de diseño se puede considerar entre 10 y 20 años pero considerando, de ser el caso, el crecimiento modular de sus componentes (CONAGUA, 2016b).

## 2.5. Estimación de caudales de aguas residuales a partir de los datos de abastecimiento de agua

Es importante la determinación de los caudales (actuales y proyectados) de agua residual a eliminar de una determinada población. Para poder proyectar las instalaciones para su recogida, tratamiento y evacuación (Metcalf y Eddy, 1995).

Para su cálculo es necesario conocer datos como la dotación, la aportación y número de habitantes. Y los caudales a calcular son: caudal medio  $Q_m$ , caudal mínimo  $Q_{min}$ , caudal máximo instantáneo  $Q_i$  y Caudal máximo extraordinario  $Q_e$ . Los tres últimos se determinan a partir del primero.

El caudal medio (ecuación 6) es el valor del caudal de aguas residuales en un día de aportación promedio al año (CONAGUA, 2016a).

$$Q_m = \frac{A * P}{86\,400} \quad (6)$$

Donde A: es la aportación de aguas residuales por día y P: es la población

El caudal mínimo (ecuación 7) es el menor de los valores de escurrimiento que normalmente se presenta en un conducto (CONAGUA, 2016a).

$$Q_{min} = \frac{Q_m}{2} \quad (7)$$

El caudal máximo instantáneo (ecuación 9) es el valor máximo de escurrimiento que se puede presentar en un instante dado (CONAGUA, 2016a). El gasto máximo instantáneo se obtiene a partir del coeficiente de Harmon, M (ecuación 8):

$$M = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{P}} \quad (8)$$

Donde P: es la población servida acumulada hasta el punto final del tramo de tubería considerada en miles de habitantes.

Este coeficiente, se aplica considerando que: En tramos con una población menos a los 1000 habitantes, el coeficiente M es constante e igual a 3.8 y para tramos con una población superior a 100,000, el coeficiente M se considera constante e igual a 2.

$$Q_i = M * Q_m \quad (9)$$

Donde M: es el coeficiente de Harmon y Qm: es el caudal medio.

El caudal máximo extraordinario (ecuación 10) considera aportaciones de agua que no forman parte de las descargas normales, como por ejemplo las aguas pluviales o un crecimiento demográfico explosivo no considerado (CONAGUA, 2016a).

$$Q_e = CS * Q_i \quad (10)$$

Donde CS: es el coeficiente de seguridad y Qi: es el gasto máximo extraordinario.

El coeficiente de seguridad con él un margen de seguridad previendo las aportaciones por concepto de aguas pluviales domiciliarias o bien, negras producto de un crecimiento demográfico explosivo.

Estos valores varían de 1 a 2. En los casos en que se diseñe la ampliación de un sistema existente de tipo combinado, previendo las aportaciones extraordinarias de origen pluvial, se podrá usar un coeficiente de seguridad de 1.5. En caso de que el alcantarillado sanitario sea separado del Alcantarillado pluvial, El coeficiente de seguridad es igual a 1.

## 2.6. Diseño del canal de control de velocidades

Este tramo de canal (figura 1) se instala para tener un control adecuado de velocidad de llegada a las rejillas, ya que normalmente se desconoce la pendiente de la tubería emisora (García-Pulido., 1999). Para su cálculo es necesario la implementación de las siguientes ecuaciones 11, 12, 13 y 14. Además, la mejor solución a la geometría de la sección es utilizar una sección rectangular (Figura 2) por la facilidad de los cálculos hidráulicos (García-Pulido., 1999).

### Canal de control de velocidades

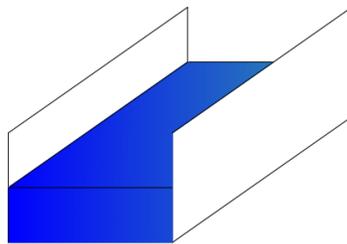


Figura 1. Canal de control de velocidades. Elaboración propia.

$$A = \frac{Q_e}{v} \quad (11)$$

Donde A: es el área del canal en m<sup>2</sup>, Q<sub>e</sub>: es el caudal máximo extraordinario en m<sup>3</sup>/s y v es la velocidad de flujo en canales en m/s.

$$h = \frac{A}{a} \quad (12)$$

Donde h: es el tirante de agua en m, A: es el área del canal en m<sup>2</sup>, a: es el ancho del canal en m.

$$h_T = h + LB \quad (13)$$

Donde h<sub>T</sub>: es la altura total en m, h el es tirante de agua en m y LB es la altura del bordo libre en m.

$$V = \frac{1}{n} * Rh^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Donde  $V$ : es la velocidad en el canal en m/s,  $n$ : es el coeficiente de Manning,  $R_h$ : es el radio hidráulico de la sección del canal y  $S$ : es la pendiente del canal.

## Sección rectangular

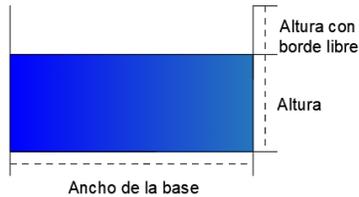


Figura 2. Sección rectangular. Elaboración propia.

### 2.7. Diseño de la caja de control de caudales

La regulación del caudal u homogenización consiste en el amortiguamiento de las variaciones de caudal para la obtención de un caudal aproximadamente constante (CONAGUA, 2016b) mediante una caja cuadrada (García-Pulido., 1999) con orificio en el fondo, para la salida del agua y uno cerca de la superficie para la entrada (Figura 3). Teniendo en cuenta tienen las siguientes ventajas como se muestra en la (Tabla 2).

**Tabla 2. Ventajas de regulación de caudal y homogenización.**

Regulación de caudal	Homogenización
Reducción o eliminación de problemas operacionales causados por las variaciones de caudal.	Mejoramiento de la tratabilidad del agua residual
El control adecuado del pH, minimizando los requerimientos posteriores de dosificación en procesos de neutralización.	Amortiguamiento de cargas pico sobre el tratamiento biológico.
Mejoramiento de la eficiencia de los procesos de tratamiento biológico mediante el control de las cargas orgánicas pico.	Dilución de sustancias inhibidoras.
Descarga de caudales muy variables al alcantarillado municipal.	Estabilización de pH.

Reducción de los requerimientos de área y las cargas para tratamiento posterior.	Mejoramiento de la eficiencia y calidad del efluente.
--	---

Elaboración propia adaptado de CONAGUA (2016b).

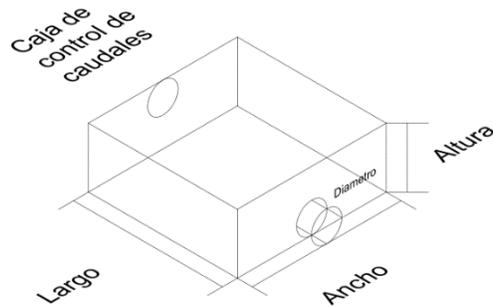


Figura 3. Caja de control de caudales. Creación propia.

Para su cálculo es necesario la implementación de las siguientes ecuaciones 15, 16, 17, 18 y 19 (García-Pulido., 1999).

$$Q_m = C_d * A * \sqrt{2 * g * h} \quad (15)$$

Donde Q: es el caudal medio en m<sup>3</sup>/s, A: es el área del orificio en m<sup>2</sup>, g: es la aceleración de la gravedad en m/s<sup>2</sup> y h: es la altura de la caja en m.

$$h_T = h + D \quad (16)$$

Donde h<sub>T</sub>: es la altura total de la caja en m, h: es la altura de la caja en m y D: es el diámetro del orificio en m.

$$Vol = Q_i * t \quad (17)$$

Donde Vol: es el volumen de la caja en m<sup>3</sup>, Q<sub>i</sub>: es el caudal máximo instantáneo en m<sup>3</sup>/s y t: es el tiempo de retención en seg.

$$A = \frac{Vol}{h} \quad (18)$$

Donde A: es el área de la caja en m<sup>2</sup>, Vol: es el volumen de la caja en m<sup>3</sup> y h: es la altura de la caja en m.

$$a = L = \sqrt{A} \quad (19)$$

Donde a: es el ancho de la caja en m, L: es el largo de la caja en m y A: es el área de la caja en m<sup>2</sup>.

Además de las ecuaciones anteriores, es necesario utilizar dos ecuaciones más (ecuaciones 20 y 21) para el diseño del vertedor (SAGARPA, 2012).

$$Av = \frac{h_T}{2} \quad (20)$$

Donde Av: es la altura del vertedor y h<sub>T</sub>: es la altura de la caja.

$$L = \frac{Q}{C * H^2} \quad (21)$$

Donde L: es la longitud del vertedor, Q: es el caudal de diseño, C: es el coeficiente del vertedor y H es la carga de diseño.

## 2.8. Diseño de cribado

En las plantas de tratamiento de aguas residuales, las rejillas (figura 4) remueven los contaminantes gruesos procedentes de la corriente para proteger de posibles daños la operación y al equipo de las unidades siguientes (CONAGUA 2016c).

Algunas de las instalaciones más modernas emplean rejillas (hasta 15 cm de paso), rejillas gruesas (de 6 mm a 2.5 cm de paso) y rejillas finas (1.5 a 6 mm de paso; CONAGUA 2016c).

Los elementos separadores pueden estar constituidos por barras, alambres o varillas paralelas, rejillas, telas metálicas o placas perforadas

A continuación, se muestran los criterios de diseño de rejillas y rejillas más comunes (Tabla 3).

**Tabla 3. Información típica para cribado.**

Características	Limpieza manual	Limpieza mecánica
Tamaño de la barra:		
Anchura, mm	5.08-15.24	5.08-15.24
Profundidad, mm	25.4-38.1	25.4-38.1
Separación entre barras, mm	25.4-50.8	15.24-76.2
Pendiente en relación a la vertical, grados	30-45	0-30

Velocidad de aproximación, m/s	0.3048-0.6096	0.6096-.9906
Perdida de carga admisible, mm	152.4	152.4

Elaboración propia tomado de Metcalf & Eddy (2003).

## Cribado

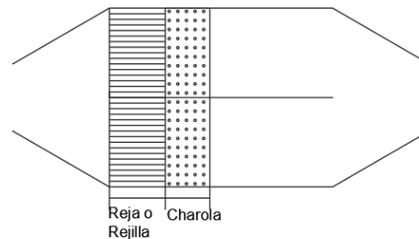


Figura 4. Cribado con reja o rejilla.

El proceso de diseño está asociado a la determinación de las pérdidas de carga que se producen al circular agua residual a través de ellos.

Las pérdidas de carga que se producen al circular agua a través de las rejas dependen de la velocidad de aproximación del agua y de la velocidad de circulación a través del elemento. La pérdida de carga se puede estimar empleando la siguiente ecuación 22.

$$h_1 = \frac{1}{0.7} \left( \frac{V^2 - v^2}{2g} \right) \quad (22)$$

Donde 0.7 es un coeficiente empírico que incluye los efectos de la turbulencia y de las pérdidas por formación de remolinos, V: es la velocidad de circulación entre las barras de la reja en m/s, v: es la velocidad de aproximación a la reja en m/s y g: es la aceleración de la gravedad en m/s<sup>2</sup>.

La ecuación solo es aplicable si las rejas se encuentran limpias. La obstrucción y obturación de las rejas incrementa las pérdidas de carga.

Las pérdidas de carga a través de las rejillas pueden obtenerse con las tablas emitidas por el fabricante, o puede calcularse por medio de la formula común para orificios (ecuación 23):

$$h_L = \frac{1}{C(2g)} \left(\frac{Q}{A}\right)^2 \quad (23)$$

Donde C: es el coeficiente de descarga de la malla, g: es la aceleración de la gravedad en m/s<sup>2</sup>, Q: es la descarga a través de la malla en m<sup>3</sup>/s y A es el área abierta efectiva de la malla sumergida en m<sup>2</sup>.

Los valores de C y A dependen de los valores de diseño de la malla, así como el tamaño y apertura de las ranuras. Un valor típico para C es de 0.6 (CONAGUA 2016c).

El criterio más utilizado para calcular la pérdida de carga en estas unidades es mediante la fórmula de Kirschmer (ecuación 24), cuando se conoce la forma de las barras y la energía de velocidad del flujo.

$$h_L = \beta \left(\frac{W}{b}\right) h_v \text{sen}\theta \quad (24)$$

Donde  $\beta$ : es un coeficiente que depende de la forma de la barra, W: es el ancho máximo de la sección transversal de las barras en m, b: es el espaciamiento entre las barras en m,  $h_v$ : es la energía de velocidad del flujo de aproximación en m y  $\theta$ : es el ángulo de la rejilla horizontal.

Es importante conocer el área del canal (ecuación 25), la velocidad antes de la reja (ecuación 26), longitud de la reja (ecuación 27), número de barras (ecuación 28) y la velocidad a través de la reja (ecuación 29) para poder determinar la pérdida hidráulica (figura 5).

$$A = W * h \quad (25)$$

Donde A: es el área del canal en m<sup>2</sup>, W: es el ancho del canal y h: es el tirante hidráulico.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (26)$$

Donde V: es la velocidad antes de la reja en m/s, Q: es el caudal en m<sup>3</sup>/s y A: es el área del canal en m<sup>2</sup>.

$$L = \frac{h+h_b}{\text{sen}\theta} \quad (27)$$

Donde L: es la longitud de la reja en m, h: es el tirante hidráulico en m,  $h_b$ : es el bordo libre en m y  $\theta$  es el ángulo de inclinación.

$$n = \frac{W-C}{C+d_b} \quad (28)$$

Donde  $n$ : es el número de barras,  $W$ : es el ancho del canal en m,  $C$ : es la apertura entre las barras en m y  $d_b$ : es el espesor de la barra en m.

$$V_r = \frac{Q}{A - Ar} \quad (29)$$

Donde  $V_r$ : es la velocidad a través de la reja en m/s,  $Q$ : es el caudal en m<sup>3</sup>/s,  $A$ : es el área del canal en m<sup>2</sup> y  $Ar$ : área de las rejas en m<sup>2</sup>.

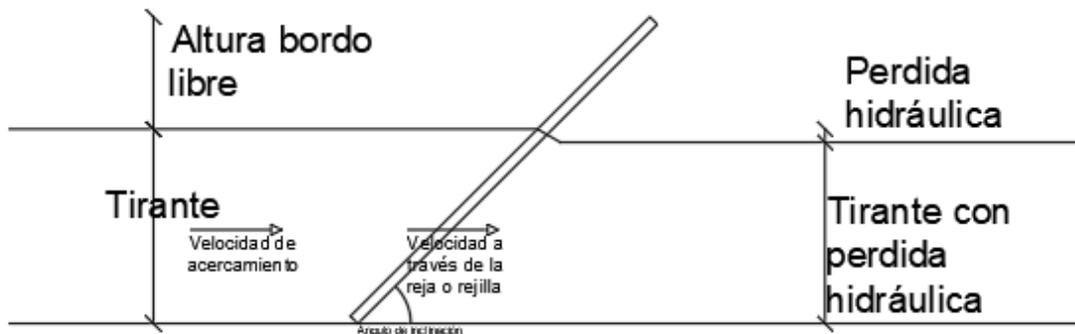


Figura 5. Variables de diseño. Elaboración propia, tomado de CONAGUA 2016c.

## 2.9. Diseño del desarenador

El desarenado es una parte importante del tratamiento de aguas residuales, evita la abrasión innecesaria y el desgaste de los equipos mecánicos, la deposición de arena en tuberías y canales, y la acumulación de arena en digestores anaerobios y tanques de aireación.

La instalación de un sistema de desarenado es ahora una práctica común para las plantas de tratamiento con equipos mecánicos y procesos del manejo de lodos, ya que la retención de las arenas evita que los equipos se deterioren. Hay tres tipos generales de desarenadores (CONAGUA 2016c): De flujo horizontal, aireado y de vórtice. En el tipo de flujo horizontal, ya sea de configuración rectangular o cuadrada (figura 6), el flujo pasa a través de la cámara en una dirección horizontal y la velocidad es controlada por las dimensiones de la unidad. El desarenador aireado (figura 7) consiste en un tanque de aireación en espiral, donde la velocidad de flujo en espiral es inducida y controlada por las dimensiones del tanque y la cantidad de aire suministrada. Y el de vórtice trabaja con un flujo de tipo vórtice y aprovecha las fuerzas centrífuga y gravitacional.

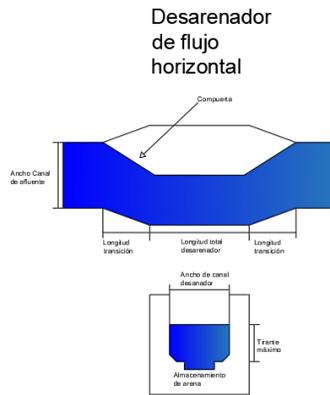


Figura 6. Desarenador de flujo horizontal. Elaboración propia.

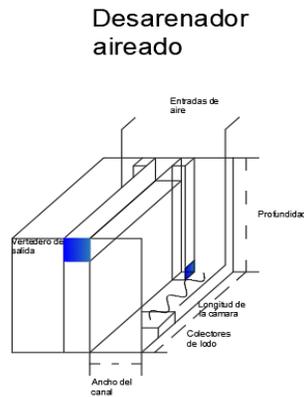


Figura 7. Desarenador aireado. Elaboración propia.

El diseño de desarenadores se basa normalmente en la eliminación de partículas de arena que tienen un peso específico de 2.65, una temperatura de aguas residuales de 15.5°C y un tamaño de partícula de 0.21 m; sin embargo, los datos encontrados para la eliminación de arena en cuanto a gravedad específica están en el rango de 1.3 – 2.7 (WPCF, 1985).

Los desarenadores de flujo horizontal rectangulares y cuadrados se han utilizado durante muchos años. Sin embargo, su uso en las nuevas instalaciones se ha limitado a favor de las cámaras de tipo aireado y vórtice (CONAGUA 2016c).

El diseño básico de los desarenadores de flujo horizontal (tabla 4) rectangulares es que, la partícula más ligera del grano llegará a la cama del canal antes del extremo de salida. Normalmente los desarenadores están diseñados para eliminar partículas de arena que se retienen en una malla de

0.21mm de diámetro, aunque muchas cámaras se diseñan para eliminar las partículas de arena que se retienen en una malla de 0.15 mm (CONAGUA 2016c).

Los desarenadores con control de velocidad son canales de sedimentación largos y estrechos, generalmente se cuenta con un mínimo de dos canales para fines de limpieza. En ocasiones, se emplean varios canales para el control de velocidad.

**Tabla 4. Criterios de diseño para desarenadores horizontales.**

Componente	Rango	Comentario
Dimensiones		
Profundidad del agua en m	0.6-1.5	Depende del área del canal y del gasto
Longitud en m	3-25	En función de la profundidad del canal y de la velocidad de sedimentación de la arena.
% adicional por entrada y turbulencia	25-50	Basado en la longitud teórica
Tiempo de retención a gasto pico en seg	15-90	En función de la velocidad y longitud del canal
Velocidad horizontal en m/s	0.15-0.4	Velocidad óptima, 0.3 m/s

Elaboración propia. Tomado de WEF (1992).

Para su cálculo se necesita determinar la velocidad de sedimentación (ecuación), comprobar el número de Reynolds, se determina el coeficiente de arrastre, se determina la velocidad de sedimentación, se realiza el ajuste de la velocidad de sedimentación, se determina la velocidad de desplazamiento, se estima el valor  $f$  mediante el gráfico 1, se determina la velocidad horizontal y por último se determina la longitud de transición de ingreso (OPS, ).

Los desarenadores aireados son similares a los tanques de aireación con flujo espiral, la corriente en espiral se genera por la acción de difusores de aire instalados en uno de los lados del tanque, a una altura de 0.6 a 0.9 m a partir del fondo. En la tabla 5 se muestra información típica para su diseño.

**Tabla 5. Información típica para desarenadores aireados.**

Elemento	Rango	Típico
Tiempo de detención a caudal punta en min	2-5	3
Dimensiones		
Profundidad del agua en m	2.0-5.0	
Longitud en m	7.5-20.0	
Anchura en m	2.5-7.0	
Relación anchura-profundidad	1:1 a 5:1	1.5:1
Relación longitud-anchura	3:1 a 5:1	4:1
Suministro de aire en m <sup>3</sup> /min*m de longitud	0.18-0.45	0.3
Cantidad de arena en m <sup>3</sup> /10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	4.0-19.5	15.0

Elaboración propia. Tomado de Metcalf & Eddy, 2003.

Para su cálculo es necesario aplicar el cálculo del gasto pico (ecuación 30), volumen de cada cámara (ecuación 31), dimensiones de la cámara (ecuación 32, 33), tiempo de retención a gasto promedio (ecuación 34), suministro de aire (ecuación 35) y volumen de arena (ecuación 36).

$$Q_P = Q_m * F_P \quad (30)$$

Donde Q<sub>p</sub>: es el caudal pico en m<sup>3</sup>/s, Q<sub>m</sub>: es caudal medio en m<sup>3</sup>/s y F<sub>p</sub>: es el factor pico.

$$V = Q_p * \frac{t_r}{n} \quad (31)$$

Donde V: es el volumen de cada cámara en m<sup>3</sup>, Q<sub>p</sub>: es el caudal pico en m<sup>3</sup>/s, t<sub>r</sub>: es el tiempo de retención y n: es el número de cámaras.

$$W = (W : h) * h \quad (32)$$

Donde W es el ancho del canal en m y h es el tirante hidráulico en m.

$$L = \frac{V}{(W * h)} \quad (33)$$

Donde L: es la longitud en m, V: es el volumen de cada cámara en m<sup>3</sup>, W: es el ancho del canal en m y h: es el tirante hidráulico en m.

$$t_p = \frac{V}{Q_m/n} \quad (34)$$

Donde  $t_p$ : es el tiempo de retención a gasto promedio en seg, V: es el volumen de cada cámara,  $Q_m$ : caudal medio  $m^3/s$  y n: número de cámaras

$$S_a = L * A_e * n \quad (35)$$

Donde  $S_a$ : es el suministro de aire en  $m^3/min$ , L: es la longitud en m,  $A_e$ : es la tasa de suministro de aire y n: es el número de cámaras.

$$V_a = C_a * Q_m * F_p \quad (36)$$

Donde  $V_a$ : es el volumen de arena producida en  $m^3/s$ ,  $C_a$ : es la concentración de arena en agua en  $m^3/1000 m^3$ ,  $Q_m$ : es el caudal pico y  $F_p$ : es el factor pico.

## 2.10. Diseño de la estructura aforadora

Un aspecto crítico en la eficiencia de explotación de una planta moderna de tratamiento de aguas residuales es la correcta selección, uso y mantenimiento de los aparatos de medición de caudal (Metcalf & Eddy, 1995).

Para caudales pequeños ( $.0025 m^3/s$ ) se recomienda utilizar vertedores triangulares (García-Pulido, 1999).

Y el caudal se obtiene mediante la ecuación 37.

$$Q = 1.4h^{5/2} \quad (37)$$

Donde h: es el tirante hidráulico en m.

Para caudales grandes se recomienda utilizar vertedores tipo Cipolletti (García-Pulido, 1999).

Donde el caudal se obtiene mediante la ecuación 38.

$$Q = 1.859Lh^{3/2} \quad (38)$$

Donde h: es el tirante hidráulico en m. y L: es el ancho de la estructura.

## 2.11. Sistema de soporte de decisiones

Un sistema de soporte de decisiones (SSD) es un sistema de información computarizado interactivo, flexible y adaptable que utiliza reglas de decisión, modelos y base de modelos junto con una base de datos integral y las propias ideas del tomador de decisiones, que llevan a decisiones específicas e

implementables para resolver problemas que no serían susceptibles de modelos de gestión de la ciencia per se. Por lo tanto, un SSD apoya la toma de decisiones complejas y aumenta su efectividad. Existen tres tipos de problemas que pueden ser resueltos por un SSD, clasificados con base a su grado de estructura (Turban, et ál., 2005). El primero de ellos se enfoca a decisiones para procesos específicos y es conocido como de decisión estructurada. Los problemas de decisión no estructurada tienen un mayor grado de libertad e incertidumbre, ya que solo prevén una parte de la información requerida para la toma de decisión. Una decisión semiestructurada es en la que existen componentes estructurados y no estructurados.

Los SSD están integrados por subsistemas (Turban, et ál., 2005): Administrador de datos, administrador del modelo, interfaz de usuario y administrador del conocimiento. El primero incluye una base de datos que contiene información relevante para una situación y es administrada por un sistema manejador de la base de datos. El segundo es un paquete de software que contiene modelos cuantitativos, estadísticos, financieros y científicos que proveen de capacidades analíticas al sistema. El tercero es una interfaz gráfica para el usuario que le sea familiar. El último soporta cada uno de los demás subsistemas o actúa como componente independiente. Provee inteligencia para argumentar la toma de decisiones.

Actualmente, los SSD basados en la web han reducido barreras tecnológicas, hecho más fácil y menos costoso la toma de decisiones de información relevante. Esto porque la infraestructura web ha permitido a múltiples compañías la implementación, a un bajo costo (Power, 1998). Gracias a la web se ha incrementado el acceso a los SSD y usando la infraestructura web para la construcción de los SSD mejorara la rápida diseminación de mejores prácticas para el análisis y como marco de referencia para la toma de decisión, lo cual debería promover la toma de mejores decisiones en tareas repetitivas.

Los SSD se pueden aplicar en la mayor parte de las industrias y funciones de negocios y dar como resultado beneficios para la organización. Algunas aplicaciones reales han sido: el ejército de U.S.A. desarrollo un SSD del potencial humano del personal, con el propósito de ayudar con las decisiones de reclutamiento, entrenamiento, educación, reclasificación y ascensos. Hewlet-Packard desarrolló Quality Decision Management para realizar funciones de calidad. Cinergy Corporation desarrolló un SSD para disminuir en forma importante el tiempo de espera y los esfuerzos requeridos para tomar decisiones en el área de la actividad de compra de carbón.

### III. METODOLOGÍA

Con el objeto de asistir a los profesionales de la ingeniería, se desarrolla para este proyecto un sistema de soporte de decisiones (SSD) en el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Además, con el objeto de facilitar el acceso al sistema, evitando la instalación de un paquete, es implementado un diseño asistido por web (DAW). El presente documento se enfoca en la etapa de pretratamiento.

La metodología para el desarrollo del proyecto sigue cuatro etapas que se muestran en la Figura 8. La primera etapa consiste tanto en la representación conceptual de los principales elementos que componen una PTAR, como en sus relaciones causales. Para ello, se definen los casos más comunes que se presentan, así como los datos básicos necesarios para el diseño. En el caso del proceso de pretratamiento se identifican las variables de entrada y salida principales.

1	2	3	4
<p><b>MODELADO CONCEPTUAL DE LOS FENÓMENOS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Identificación de las variables y la manera en que se interrelacionan en una PTAR</li> </ul>	<p><b>INGENIERÍA DE REQUERIMIENTOS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo conceptual del sistema</li> <li>Diseño del sistema</li> </ul>	<p><b>DESARROLLO DE FUNCIONES Y SCRIPTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Construcción de algoritmos</li> </ul>	<p><b>PRUEBAS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Diseño de interfaz</li> <li>Casos de estudio</li> <li>Discusión</li> </ul>

Figura 8. Metodología para el desarrollo de una aplicación web para el diseño de una PTAR. Basado en Fonseca et al. (2017)

La tabla 6 representa los principales procesos asociados al pretratamiento. En ella, es posible observar que dichos procesos no requieren de un alto número de variables para su cálculo.

**Tabla 6. Inputs y outputs de los procesos del pretratamiento de una PTAR.**

Proceso	Descripción	Características de implementación	Inputs	Outputs	Fuentes
Cálculo de población futura	Población futura obtenida de una base de datos. Se realizan cálculos por medio de progresiones geométricas, para una proyección a 30 años a futuro.	Generalmente, se emplea para tratamiento de aguas domésticas. Esta debe ser suministrada por el usuario a través de la ubicación, mediante el acceso a una base de datos	Ubicación	$P_f$ $P_a$	Garcia-Pulido (1999)
Cálculo de Caudales	Este cálculo se realiza para conocer los distintos caudales (medio, máximo, mínimo), con los que trabajara la planta.	Generalmente se emplea para tratamiento de aguas domésticas. El usuario puede proporcionar los datos o ser calculados por medio de la población futura y actual del punto anterior.	Dotación $P_{Fut}$ $C$ $Q_{MedAct}$	Aportación $Q_{MinAct}$ $Q_{IAct}$ $Q_{EAct}$ $Q_{MedFut}$ $Q_{MinFut}$ $Q_{IFut}$ $Q_{EFut}$	Garcia-Pulido (1999)
Canal de control de velocidades	Este tramo del canal se instala para tener un control adecuado de velocidad de llegada a las rejillas ya que normalmente se desconoce la pendiente de la tubería emisora	Se propone un ancho y un libre bordo acorde a los caudales.	$V_f$ $LB_{Fut}$ $a_{Fut}$ Coef. Rugosidad	$Q_{EFut}$ $A_{Fut}$ $H_{Fut}$ $H_{LBFut}$ $S_c$	Garcia-Pulido (1999)

Caja de control de caudales	Considerando que el gasto de diseño es el correspondiente al $Q_{max\ inst}$ , debe entonces existir una estructura que permita el paso de este y desalojar la diferencia entre los gastos $Q_{max\ ext}$ y $Q_{max\ inst}$ ,	Se propone para controlar los caudales una caja con un orificio en el fondo para la salida del agua y uno cerca de la superficie para la entrada	$C_d$ $D_t$ $Q_{MedAct}$ $Q_{vert}$	$h$ $h_t$ $VolCaja$ $ACaja$ $LL$ $L_v$ $Pe$ $tr$ $C_{vert}$	Garcia-Pulido (1999)
Rejillas	Las rejillas son estructuras formadas por barras de acero generalmente. Estas permiten pasar papeles, excretas y material más fino, reteniendo en cambio materiales de mayor tamaño, tales como guijarros, palos, desperdicios vegetales, plásticos, latas, basura, etc	Normalmente para su construcción se utilizan barras que se obtengan de manera fácil y que sean comunes. De igual manera se propone una separación entre barras no mayor a 2.5 cm.	$DBarr$ $SBarr$ $\Theta Barr$ $Katas$ $KBarr$	$At$ $As$ $h_{max}$ $L_s$ $w$ $h_c$ $V_{QI}$ $V_{QMed}$ $h_P$ $AR$ $L$ $S$	Garcia-Pulido (1999)
Estructura de aforo	Es necesario obtener los caudales cada hora para poder determinar el $Q$ medio, $Q$ máximo, $Q$ mínimo, que a su vez serán básicos para obtener el tiempo de detención teórico de cada estructura	Se recomiendan utilizar dos tipos de vertedores de acuerdo con el caudal. Los vertedores son Triangular y Cipolletti. El primero para caudales pequeños, y el segundo para caudales grandes.		$h$ $Q_{mVert}$	Garcia-Pulido (1999)

Desarenador	Cámara diseñada para reducir la velocidad del agua residual y permitir la remoción de sólidos minerales (arena y otros), por sedimentación.	Los desarenadores más comunes para el tratamiento de aguas residuales son: Desarenador de flujo horizontal  -Desarenador aireado	Tipo  Factor pico  Numero cámaras  Tiempo de retención  Profundidad  Relación ancho/profundo	$Q_{MedAct}$ $Q_{pico}$ $Vol_{Tot}$ $Vol_{Cam}$ $V_s$ $C_D$ $CH$ $CH_{real}$ $V_a$ $V_c$ $a$ $L$ $t_{ret}Q$ suministro de aire  $Vol_{Arena}$	García-Pulido (1999)
-------------	---	---	--	--	----------------------

Nota: Población futura ( $P_{fut}$ ), Población actual ( $P_{act}$ ), Coeficiente de Harmmon de la población actual ( $M_{act}$ ), Coeficiente de Harmmon de la población futura ( $M_{fut}$ ), Coeficiente de precisión futuro ( $C_{fut}$ ), Coeficiente de precisión actual ( $C_{act}$ ), Caudal medio actual ( $Q_{MedAct}$ ), Caudal mínimo actual ( $Q_{MinAct}$ ), Caudal máximo instantáneo actual ( $Q_{MaxAct}$ ), Caudal máximo extemporáneo actual ( $Q_{ExtAct}$ ), Caudal medio futuro ( $Q_{MedFut}$ ), Caudal mínimo futuro ( $Q_{MinFut}$ ), Caudal máximo instantáneo futuro ( $Q_{MaxFut}$ ), Caudal máximo extraordinario futuro ( $Q_{ExtFut}$ ), Pendiente canal ( $S_c$ ), Área futura ( $A_{Fut}$ ), Altura futura ( $H_{Fut}$ ), Altura con bordo libre futura ( $H_{LB_{Fut}}$ ), Libre bordo futuro ( $LB_{Fut}$ ), Ancho futuro ( $a_{Fut}$ ), Ancho actual ( $a_{Act}$ ), Velocidad de flujo en canales ( $V_f$ ), Diámetro de tubería ( $D_t$ ), Diámetro de barras ( $D_{Barr}$ ), Separación de barras ( $S_{Barr}$ ), Angulo de inclinación de las barras ( $\theta_{Barr}$ ), Coeficiente de atascamiento ( $K_{atas}$ ), Coeficiente de sección transversal de barras ( $K_{Barr}$ ), Área transversal del colector ( $A_t$ ), Área de reja sumergida ( $A_s$ ), Tirante máximo ( $h_{max}$ ), Longitud sumergida ( $L_s$ ), ancho de canal de rejillas ( $w$ ), Perdidas de carga ( $h_c$ ), Velocidad a través de las rejillas con  $Q_t$  ( $V_{Qt}$ ), Velocidad a través de las rejillas con  $Q_{Med}$  ( $V_{QMed}$ ), Coeficiente de descarga ( $C_d$ ), Altura total de la caja ( $h_t$ ), Volumen de la caja ( $Vol_{Caja}$ ), Área de la caja ( $A_{Caja}$ ), Longitud de lados ( $L_L$ ), Longitud vertedor ( $L_v$ ), Perímetro mojado ( $P_e$ ), Tiempo de retención ( $t_r$ ), Carga del vertedor ( $C_{vert}$ ), Ancho de cada canal ( $A_R$ ), Longitud del canal ( $L$ ), Ancho canal ( $B$ ), Ancho de escotadura ( $b$ ), Tirante ( $h$ ), Angulo vertedor triangular ( $\theta_{tri}$ ), Volumen ( $Vol$ ), Volumen Total ( $Vol_{Tot}$ ), Volumen de cámara ( $Vol_{Cam}$ ), Velocidad de asentamiento de la partícula en el líquido en reposo ( $V_s$ ), Carga hidráulica ( $CH$ ), Carga hidráulica real ( $CH_{real}$ ), Velocidad horizontal ( $V_a$ ), Velocidad crítica del líquido ( $V_c$ ).

El objetivo de la segunda etapa es diseñar la arquitectura y el funcionamiento del SSD. Para ello se pueden seguir dos fases: estrategia de alcance y fase de mapeo (Bagriyanik y Karahoca, 2016).

En la estrategia de alcance se determinan los requerimientos funcionales del usuario, teniendo como criterio principal para el diseño la facilidad de uso, es decir que la aplicación sea amigable con el usuario, además se procura que la información requerida para su funcionamiento sea la menor posible.

En esta fase también se determinan los distintos procesos del pretratamiento ofrecidos al usuario por la aplicación, con base en los criterios de selección de procesos para la primera versión del SSD, están basados en trenes de procesos de mayor frecuencia de uso y generalización de su uso para mayor variedad de aguas residuales.

En la fase de mapeo se representan las clases de objetos y las relaciones entre ellos mediante diagramas de interacción (Bagriyanik y Karahoca, 2016), en estos se emplea la terminología que es generalmente usada para describir las clases de requerimiento en el campo de desarrollo de software (Bagriyanik y Karahoca, 2016). También se elaboran diagramas de agregación y secuencia (Bagriyanik y Karahoca, 2016), creados en un lenguaje unificado de modelado (UML por sus siglas en inglés). Estos muestran la estructura estática y la relación dinámica respectivamente de los elementos de la estructura del SSD.

En la tercera etapa de la metodología son codificados los procedimientos matemáticos del diseño de cada uno de los procesos considerados en el tren de tratamiento. Para ello, se programó en lenguaje JavaScript (Developer Mozilla, 2018), para agilizar y reducir los tiempos de ejecución; así como mejorar la funcionalidad dinámica del propio sistema.

La mayoría de los cálculos requeridos para los distintos procedimientos del pretratamiento requieren relativamente pocos recursos computacionales para su obtención, permitiendo considerar ejecuciones en tiempo real.

Sin embargo, algunos de los inputs requeridos, tales como coeficientes hidráulicos o datos obtenidos de tablas, son elegidos por el usuario mediante la asistencia de la aplicación, que ofrece criterios o rangos preestablecidos, con lo que se requiere ofrecer al usuario, mediante los límites preestablecidos en el mismo input y botones de información que complementen estos criterios y rangos.

En la cuarta etapa se propone el diseño de la interfaz. En primera instancia es considerada la plataforma de desarrollo Eclipse Oxygen (2017), la cual es una plataforma de software compuesto por un conjunto de herramientas de programación de código abierto multiplataforma para desarrollar lo que el proyecto llama "Aplicaciones de Cliente Enriquecido", Dentro de esta plataforma, se ofrece la creación de proyectos web, que brinda un modelo basado en HTML, JavaScript y CSS, como otros componentes esenciales para el funcionamiento de la aplicación web. Además, se implementa la metodología para un caso de estudio. Por ejemplo, una planta piloto para 16,948 usuarios y una

descarga de  $.01177 \text{ m}^3/\text{s}$ . Con ello, será posible discutir y validar los parámetros de diseño obtenidos desde la aplicación con la literatura asociada. Además, permite tener un menor grado de incertidumbre de los cálculos realizados por la aplicación.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Partiendo del modelo conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales asociado a la etapa 1 de la metodología, en la fase de pretratamiento (Figura 9), se generó un segundo modelo para identificar las variables ligadas y su interrelación existente entre las mismas (Figura 10). Dentro de las variables identificadas se encontró un número total de 129 variables, de las cuales, 3 de ellas (caudal medio actual, caudal máximo extraordinario actual y caudal máximo extraordinario proyectado) fueron las que más influyeron sobre las demás.

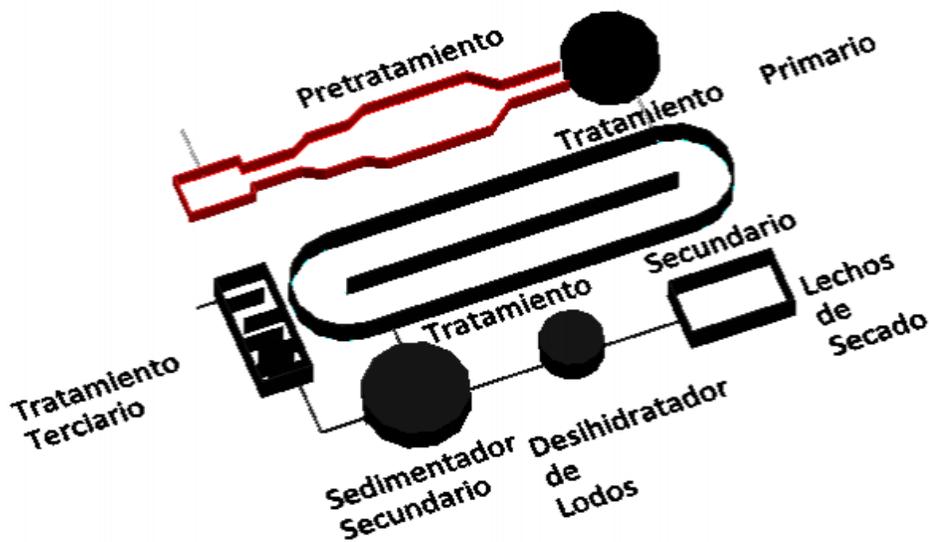


Figura 9. Modelo conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales.

A partir de estos modelos, se priorizó el alcance informático de la segunda etapa de la metodología, llamada ingeniería de requerimientos. Se realizó un diseño para el pretratamiento, en el cual se incluyen los procesos unitarios más comunes.

Los procesos unitarios que se incluyeron en el diseño fueron: población de proyecto y cálculo de caudales, caja de control de caudales, canal de velocidades, cribado por medio de rejillas y rejillas,

desarenador y estructura de aforo. En el caso de cribado se deja la posibilidad de poder escoger entre rejas y rejillas automáticas o rejas y rejillas manuales, según necesite el usuario. Lo mismo ocurre para el desarenador, ofreciendo dos tipos de desarenadores más comunes, el desarenador de flujo horizontal y el desarenador aireado.

Estos procesos no quedan limitados a poder expandirlos en futuras versiones del sistema o a un mejoramiento de los ya establecidos en esta primera versión.

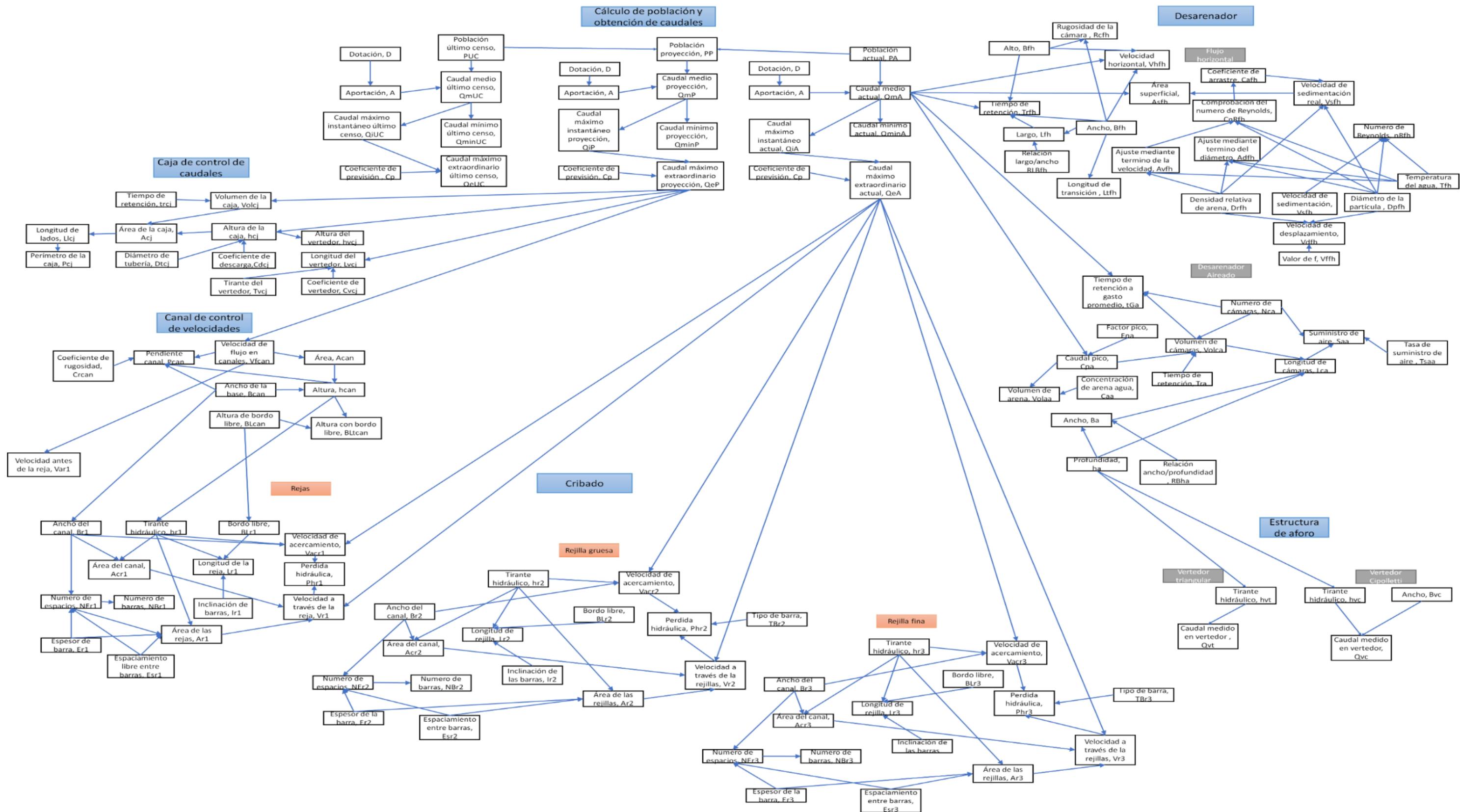


Figura 10. Modelo de variables para el pretratamiento y su interrelación.

Se logró diseñar la arquitectura y funcionamiento del SSD asociado a la etapa 2 de la metodología (Figura 11), se observan las interacciones que se producen entre los componentes del sistema, como entrada y salida de datos. El sistema este compuesto por los siguientes elementos: El usuario, el servidor, el entorno Java.jsp, los scripts .js y la base de datos.

El funcionamiento es el siguiente: el usuario accede a través de su navegador de internet a la aplicación web y éste a su vez debe de proporcionar datos de entrada a la aplicación para que la misma le otorgue datos de salida. El servidor es el que administra la conexión entre el navegador del usuario y la aplicación web. El entorno Java es la estructura principal de la aplicación web, dicho en otras palabras, es la parte que contiene almacenada la información visible para el usuario como también imágenes y diseño propio de la aplicación. Los scripts tienen almacenado las funciones matemáticas como dinámicas con las que opera la aplicación web. Y por último la base de datos contiene información de censos recabada de CONAPO (2017), como también información del usuario para acceso a la aplicación y creación de proyectos y respaldo de sus proyectos elaborados en la aplicación.

Sin embargo, al ser la primera versión del sistema se puede mejorar la arquitectura y funcionamiento del SSD. Por ejemplo, podría mejorarse el menú, la interfaz en general, las imágenes para el apoyo al usuario.

# Diagrama de interacción

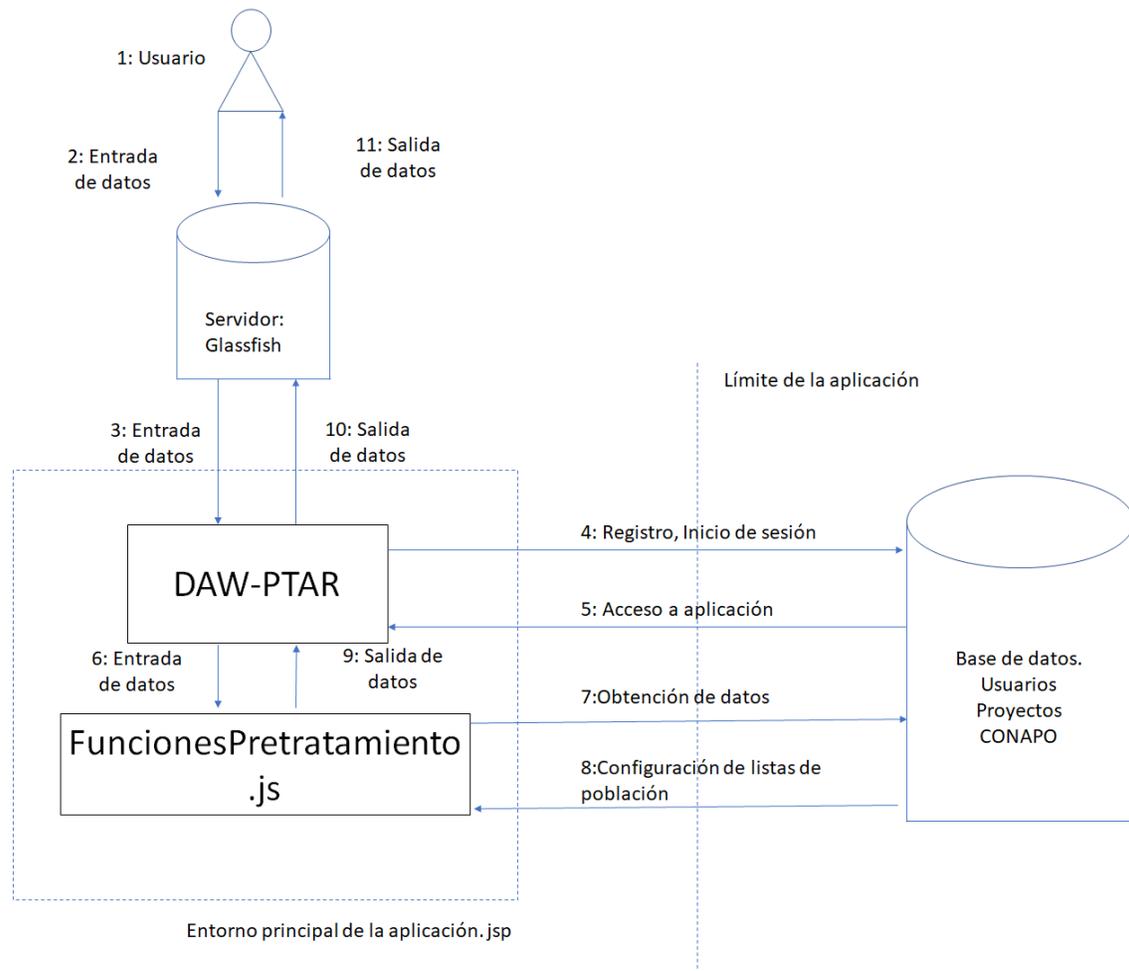


Figura 11. Diagrama de interacción.

La implementación de una base de datos para el sistema contiene componentes adoptados como la base de datos de poblaciones de CONAPO (2017). También contiene la base de usuarios, la cual almacena los perfiles creados mediante un e-mail y que están protegidos por contraseña. Esta base de usuarios se complementa con la base de proyectos, donde el usuario puede almacenar los diseños que ha creado asociándolos a su perfil para acceder a ellos posteriormente, para su consulta o modificación.

Siguiendo la arquitectura y funcionamiento del SSD, se modeló el diagrama UML (Unified Modeling Language) de clases (Figura 12). En él se observa la estructura de la aplicación web. Las funciones desarrolladas específicamente para el diseño de la fase de pretratamiento asociadas a la etapa 3 de la metodología se encuentran en la clase "js", así como la estructura del entorno principal del

pretratamiento se encuentra en la clase denominada como “jsp” (ambos asociados al lenguaje de programación).

Continuando con el desarrollo de funciones y scripts de cálculo, que se realizaron a partir de los criterios de diseño, propuestos en el marco teórico de este trabajo, se programaron las funciones para cada proceso unitario y las cuales contienen las variables, rangos y criterios asociados a cada proceso. Además, se importaron librerías de JavaScript para el correcto funcionamiento de funciones matemáticas, librerías del servidor Glassfish para su funcionamiento, librerías Java para el correcto funcionamiento del entorno de la aplicación como para la configuración de la base de datos MySQL, solo por mencionar algunas.

Fueron desarrolladas 6 funciones, una para cada proceso unitario (Anexo 1). A su vez fue necesario el desarrollo de la base de datos con la información de CONAPO (2017) y el desarrollo de funciones para la utilización de esta base, como para el registro y acceso de usuario y el respaldo de los proyectos creados en la aplicación, asociadas al lenguaje de programación de la base de datos. También se utilizaron funciones para la presentación de los procesos mediante etapas y para realizar la exportación del diseño se hace mediante un reporte el cual puede ser impreso o guardado en formato PDF (formato digital de estándar abierto).

Cabe resaltar que la información de CONAPO (2017) contenida en la base de datos MySQL puede actualizarse en futuras versiones, esto en relación a los datos que llegara a ofrecer CONAPO (2017).

## Diagrama de clases

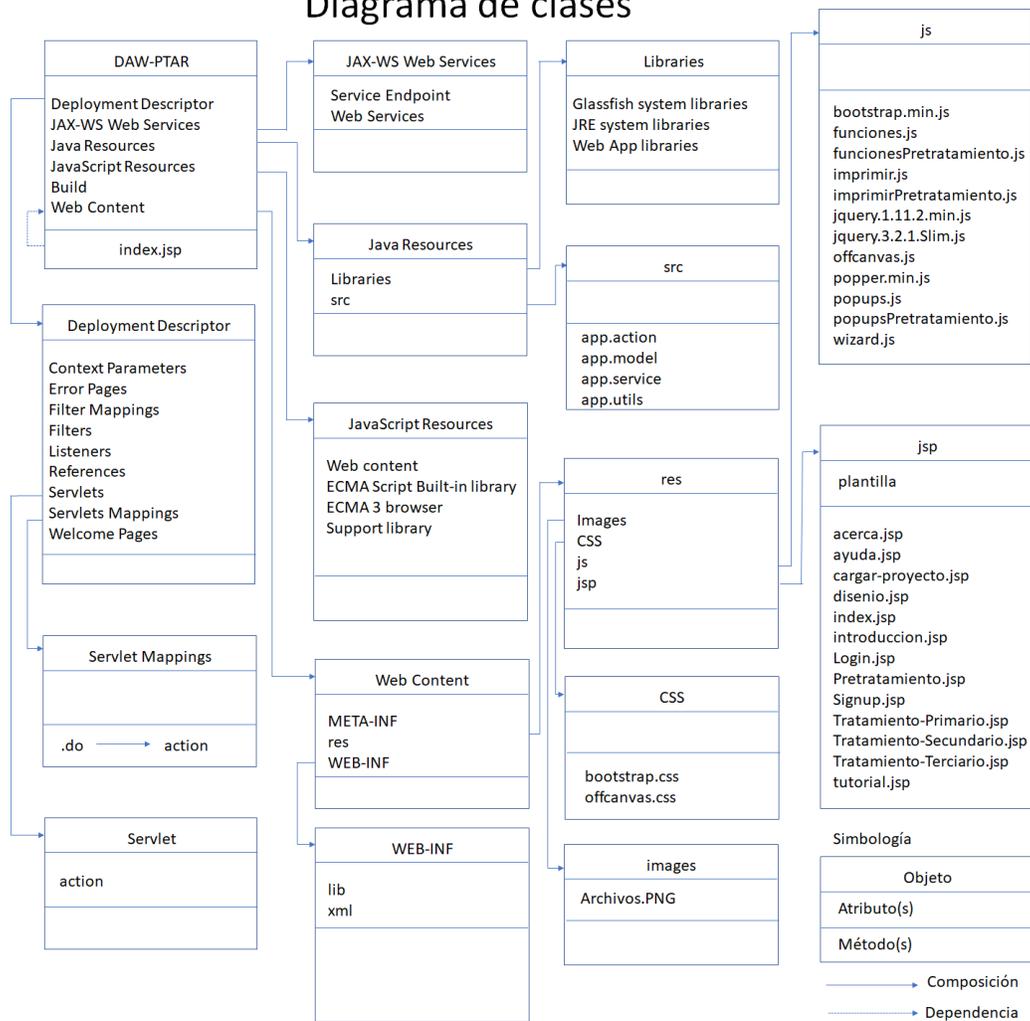


Figura 12. Diagrama de clases.

La secuencia de funcionamiento de la aplicación (Figura 13) se muestra mediante un diagrama UML, en el cual puede observarse la interacción del usuario con la aplicación y esta a su vez con los elementos de Pretratamiento.jsp y FuncionesPretratamiento.js. Estos elementos proporcionan las variables de entrada y salida del diseño, así como la información que da soporte al SSD.

## Diagrama de secuencia

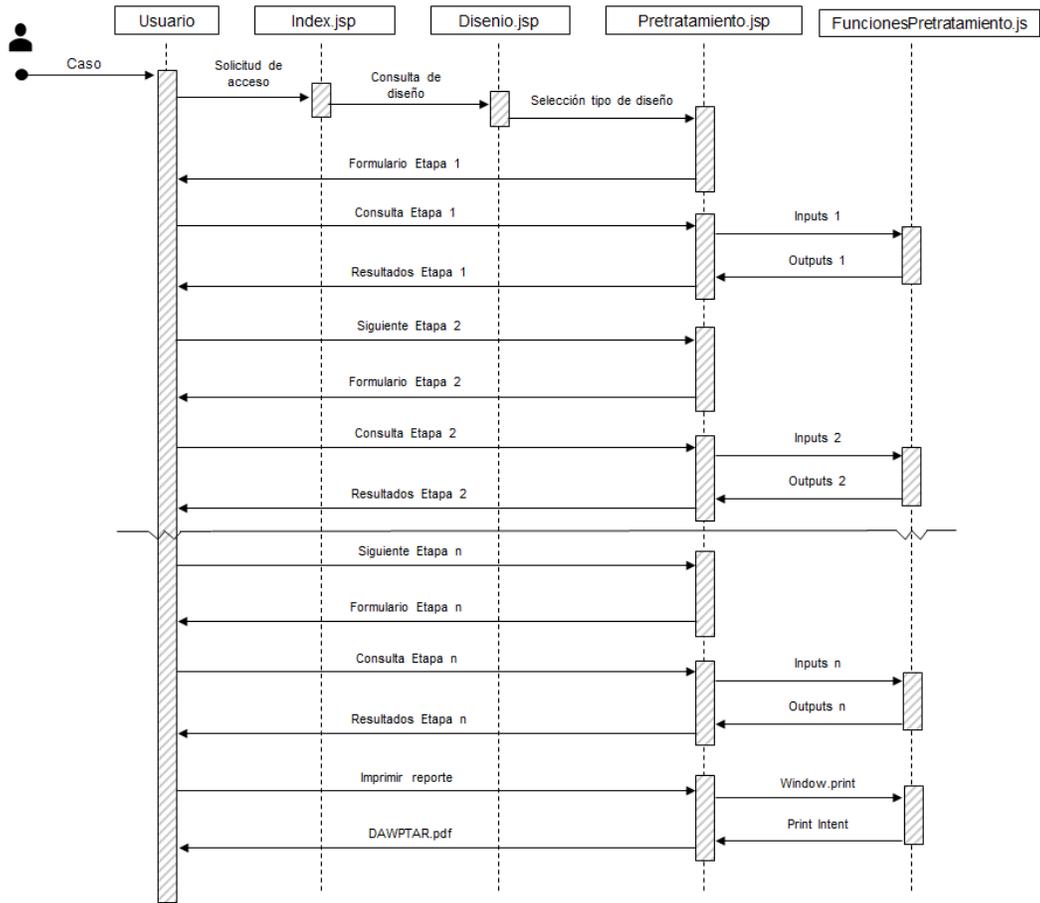


Figura 13. Diagrama de secuencia.

Se diseñó la interfaz del sistema de soporte de decisiones asociado a la etapa 4 de la metodología, siguiendo el objetivo primordial planteado en el SSD, que fuera simple de entender y utilizar para un usuario con conocimientos básicos respecto al diseño de plantas de tratamiento. Donde el primer contacto del usuario es la interfaz principal de DAW PTAR (Figura 14). Aquí el usuario tiene acceso a la introducción de la aplicación (Figura 15), ayuda para el usuario (Figura 16) que de ser necesario se da acceso al tutorial de uso de la aplicación, información acerca de la aplicación, de los desarrolladores e información de la bibliografía empleada para dar soporte a los criterios y rangos propuestos (Figura 17), acceso a las paginas oficiales de la UAEMex y del CIRA, la creación de un nuevo proyecto de pretratamiento (Figura 18) o la posibilidad de cargar un proyecto ya comenzado.

Se realizó el diseño de la interfaz pensando en ser amigable con el usuario y visualmente agradable, utilizando elementos que son comunes en el campo de desarrollo de software, como son botones de acceso a otras secciones de la aplicación.

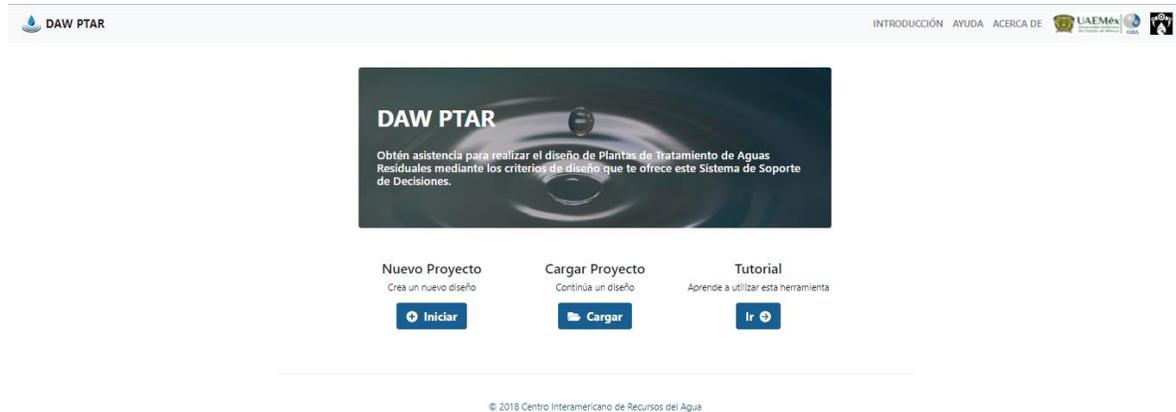


Figura 14. Interfaz de la aplicación, menú principal.

Se realizó una pequeña introducción de la aplicación y cuál es el objetivo que busca cumplir. Sin embargo, en versiones futuras se podría ampliar estos objetivos o incluso cambiar totalmente el objetivo de ser un SSD a ser una aplicación de diseño.



Figura 15. Introducción al DAW PTAR

El tutorial sirve para presentarle al usuario el uso de la aplicación mediante ejemplos de la operación y descripción de los elementos que la componen.

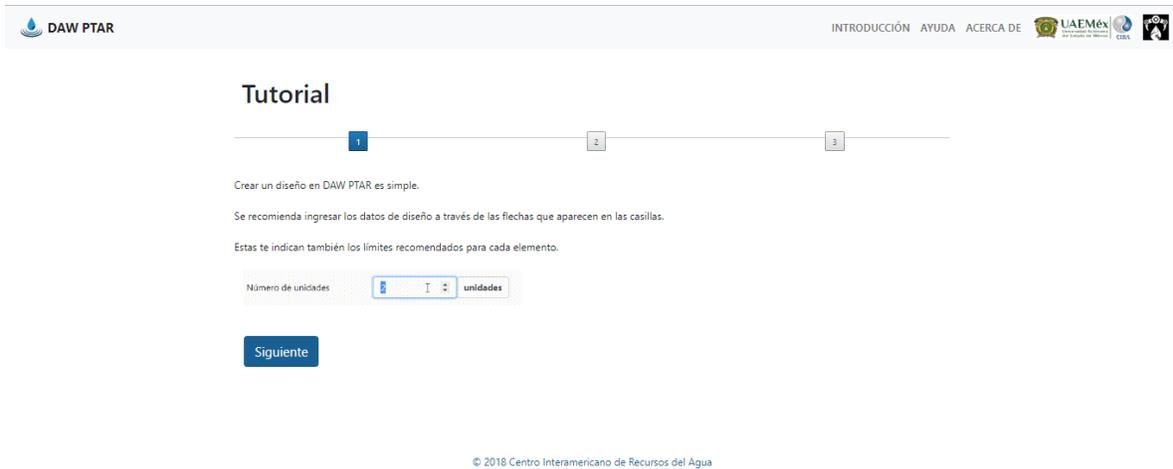


Figura 16. Tutorial de uso de la aplicación.

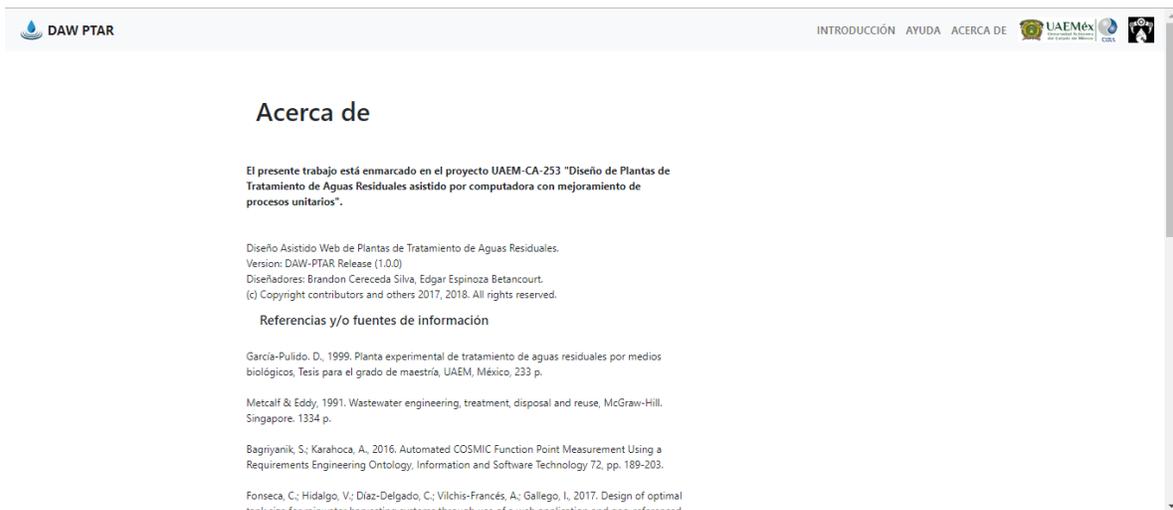


Figura 17. Información acerca de la aplicación, desarrolladores y bibliografía empleada

Quando el usuario decide crear un nuevo proyecto, se le despliega un menú con las distintas fases de tratamiento que puede elegir, en este caso el proyecto está limitado solo a la fase de pretratamiento (Figura 19), pero queda abierto a los que retomen el proyecto continúen ampliando las fases de tratamiento, como mejorar cada una de estas fases con más procesos unitarios.

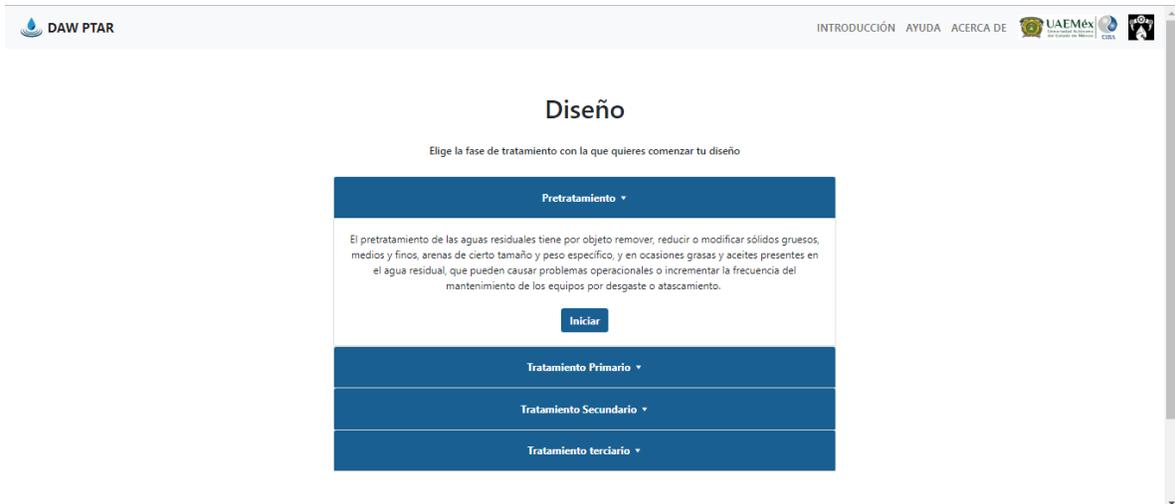


Figura 18. Selección de la fase de tratamiento de diseñar.



Figura 19. Fase de pretratamiento

La interfaz de diseño se implementó mediante un diseño por pasos (Figura 20), el cual separa cada uno de los procesos unitarios del pretratamiento, esto con la finalidad de no cargar de información visual al usuario. Además, el funcionamiento esta dado por el ingreso de datos requeridos (inputs) para cada etapa, así como sus respectivas salidas (outputs) mostradas en la figura 21 y teniendo el apoyo de información para complementar su decisión mediante los botones de información (Figura 22).



Figura 20. Diseño por pasos.

Diámetro de tuberías	Selecciona un diámetro de tubería
Diámetro	<input type="text"/> m
Coefficiente de descarga	<input type="text" value="0.6"/>
Altura de la caja	<input type="text"/> m
Tiempo de retención	<input type="text" value="30"/> seg
Volumen de la caja	<input type="text"/> m
Área de la caja	<input type="text"/> m <sup>2</sup>
Longitud de lados	<input type="text"/> m
Perímetro de la caja	<input type="text"/> m
Diseño del Vertedor	
Coefficiente del vertedor	<input type="text" value="2"/>

Figura 21. Datos entrada requeridos y datos de salida.

Caudal Máximo Instantaneo Futuro	<input type="text" value="30.2253"/> Ips	<p>Es la relación entre el caudal real, que se mide a través del aforo volumétrico y el caudal teórico, que se define por el área del orificio y la velocidad teórica. También es posible describir este coeficiente como el producto del coeficiente de contracción y el coeficiente de velocidad. Y tiene una variación entre 0.20 a 0.68</p> <p>Rodriguez, H., (2001). Hidraulica Experimental. Colombia: ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA, p.112</p>
Diámetro de tuberías	Selecciona un diámetro de tubería	
Diámetro	<input type="text"/> m	<input type="button" value="i"/>
Coefficiente de descarga	<input type="text" value="0.6"/>	<input type="button" value="i"/>
Altura de la caja	<input type="text"/> m	
Tiempo de retención	<input type="text" value="30"/> seg	<input type="button" value="i"/>

Figura 22. Botones de información que dan soporte a las decisiones del usuario.

Adicionalmente, las casillas para ingreso de información (Figura 23) que cuentan con un valor preestablecido, incorporan botones que aumentan o disminuyen el valor en función de los criterios de

diseño, también incorporando un valor mínimo y un máximo. Sin embargo, el usuario tendrá la opción de introducir otro valor con el teclado, pudiendo estar fuera de los rangos recomendados.



Figura 23. Casilla de ingreso de información con botones que aumentan o disminuyen el valor. Existen casillas de validación (Figura 24), estas se utilizan en criterios de mayor relevancia para el correcto funcionamiento del diseño realizado. Cambian su apariencia para reflejar el resultado de la validación; son de color verde si cumplen con el criterio y de color rojo si no cumplen con dichos criterios.



Figura 24. Casillas de validación de criterios.

Finalmente, se da continuidad a la etapa 4 asociada a la metodología con la aplicación del sistema de soporte de decisiones en un caso de estudio para la población de San Cayetano de Morelos, Estado de México, los datos empleados para la aplicación son los obtenidos de la base de datos de CONAPO (2017). Los siguientes datos obtenidos son del programa y es comparado con otro diseño similar (Tabla 7)

**Tabla 7. Caso de estudio utilizando el SSD.**

Población: San Cayetano Morelos, Toluca, Estado de México.	Inputs			Outputs		
	DAW PTAR (Aplicación)	García-Pulido (Memoria de cálculo)	DAW PTAR utilizando datos de población García-Pulido (Aplicación con datos de memoria de cálculo)	DAW PTAR (Aplicación)	García-Pulido (Memoria de cálculo)	DAW PTAR utilizando datos de población de García-Pulido (Aplicación con datos de memoria de cálculo)
<b>Calculo de población futura y obtención de caudales</b>						
Dotación, l/hab*día	150	150	150			
Aportación, %	80	80	80			
Coeficiente de previsión	2	2	2			
Utilizar base de datos CONAPO	Si	No	No			
Selección de localidad	San Cayetano Morelos, Toluca,	San Cayetano Morelos, Toluca,	San Cayetano Morelos, Toluca,			

	Estado de México.	Estado de México.	Estado de México.			
Población último censo, hab		3517	3517	4554		
Población actual, hab		4571	4571	5462		
Población proyección, hab		16948	16948	6621		
Caudal medio último censo, l/s				6.325	4.89	4.8847
Caudal mínimo último censo, l/s				3.1625	2.44	2.4424
Caudal máximo instantáneo último censo, l/s				20.7609	16.51	16.5242
Caudal máximo extraordinario último censo, l/s				41.5218	33.00	33.0484
Caudal medio año actual, l/s				7.5861	6.35	6.3486
Caudal mínimo año actual, l/s				3.7931	3.18	3.1743
Caudal máximo instantáneo año actual, l/s				24.3455	20.83	20.8290
Caudal máximo extraordinario año actual, l/s				48.6909	41.66	41.6580
Caudal medio año de proyección, l/s				9.1958	23.54	23.5389
Caudal mínimo año de proyección, l/s				4.5979	11.77	11.7694
Caudal máximo instantáneo año de proyección, l/s				28.7819	64.14	64.1392
Caudal máximo extraordinario año de proyección, l/s				57.5638	128.28	128.2784
<b>Caja de control de caudales</b>						
Caudal máximo instantáneo futuro, l/s				28.7819	64.14	64.1392
Diámetro de tubería, pulg	8					
Diámetro de tubería, m		.20	.20	0.203		
Coefficiente de descarga	0.6	0.6	0.6			
Altura de la caja, m				0.31	0.80	0.79
Tiempo de retención, seg	30	30	30			
Volumen de la caja, m <sup>3</sup>				0.86	1.93	1.92
Área de la caja, m <sup>2</sup>				2.79	2.42	2.44
Longitud de lados, m				1.67	1.56	1.56
Perímetro de la caja, m				6.68	6.24	6.24
Coefficiente de vertedor	2		2			
Tirante del vertedor, m	0.15		0.15			

Longitud del vertedor, m				0.25		0.55
Altura del vertedor				0.15		0.40
<b>Canal de control de velocidades</b>						
Caudal máximo extraordinario futuro, l/s				57.5638	128.28	128.2784
Velocidad de flujo en canales, m/s	0.3	1.2	1.2			
Área, m <sup>2</sup>				0.08	0.1069	0.11
Ancho de la base, m	1	0.6	0.6			
Altura, m				0.08	0.18	0.18
Altura del bordo libre, m	0.2	0.12	0.12			
Altura con bordo libre, m				0.28	0.30	0.30
Coefficiente de rugosidad	Concreto terminado		Concreto terminado			
Pendiente, %				0.02		0.389
<b>Cribado</b>						
Sistema de limpieza	Manual	Manual	Manual			
Sistema de cribado	Reja y rejilla gruesa	Reja	Reja			
Reja						
Espesor de la barra, cm	1.524	1.27	1.27			
Inclinación de las barras, °	45	45	45			
Espaciamiento libre entre barras, cm	3.8	2.5	2.5			
Tirante hidráulico, m				0.19		0.18
Ancho del canal, m				1	0.42	0.6
Bordo libre, m				0.2		0.12
Área del canal, m <sup>2</sup>				0.19		0.108
Caudal máximo instantáneo actual, l/s				24.3455		20.8290
Velocidad antes de la reja, m/s				0.3		1.2
Longitud de la reja, m				0.55	0.15	0.42
Número de barras				17	12	10
Número de espacios				18	11	11
Velocidad de acercamiento aguas arriba, m/s				0.13		0.20
Área de las rejillas, m <sup>2</sup>				0.05		0.03
Velocidad a través de la reja, m/s				0.18	0.33	0.27
Perdida Hidráulica, mm				1.0373	5.6	2.3643
Rejilla Gruesa						
Espesor de la barra, cm	1.016					
Tipo de barra	Circular					
Inclinación de las barras, °	45					
Espaciamiento libre entre barras, cm	1.5					
Tirante hidráulico, m				0.19		

Ancho del canal, m				1		
Bordo libre, m				0.2		
Área del canal, m <sup>2</sup>				0.19		
Caudal máximo instantáneo actual, l/s				24.3455		
Longitud de la reja, m				0.55		
Número de barras				38		
Número de espacios				39		
Velocidad de acercamiento aguas arriba, m/s				0.13		
Área de las rejillas, m <sup>2</sup>				0.08		
Velocidad a través de la reja, m/s				0.21		
Perdida Hidráulica, mm				0.643		
<b>Desarenador</b>						
Tipo de desarenador	Aireado	Flujo Horizontal	Flujo Horizontal			
Factor pico	2					
Caudal medio actual, l/s				7.5861		6.3486
Caudal pico, m <sup>3</sup> /s				0.0152	20.83	
Numero de cámaras	2					
Tiempo de retención, min	3					
Volumen de cámaras, m <sup>3</sup>				1.37	1.25	
Profundidad, m	2					
Relación ancho/profundidad	1.5					
Ancho del canal, m				3		
Relación ancho/largo	4					
Longitud de cámaras, m				0.23		
Tiempo de retención a gasto promedio, seg				6		
Tasa de suministro de aire, m <sup>3</sup> /min	0.3					
Suministro de aire, m <sup>3</sup> /min				0.14		
Concentración de arena en agua, m <sup>3</sup> /1000 m <sup>3</sup>	0.150					
Volumen de arena, m <sup>3</sup> /día				0.16		
<b>Desarenador de flujo horizontal</b>						
Numero de cámaras desarenadoras			2			
Caudal medio actual, l/s						6.3486
Densidad relativa de la arena, kg/m <sup>3</sup>					2.65	2.65
Diámetro de la partícula, cm		0.02	0.02			

Temperatura del agua, °C			20			
Velocidad de sedimentación, m/s						3.56
Numero de Reynolds					0.3093	7.05
Ajuste mediante término del diámetro, m						5.02
Ajuste mediante término de la velocidad de sedimentación, m						2.54
Comprobación del número de Reynolds						5.02
Coeficiente de arrastre						6.46
Velocidad de sedimentación real, cm/s						2.59
Área superficial, m <sup>2</sup>						0.43
Ancho, m		1	0.7			
Relación largo/ancho		10	10			
Largo, m					10	7
Alto, m		1	1			
Velocidad horizontal, cm/s						0.91
Rugosidad de la cámara						8500
Valor de f		0.03	0.027			
Velocidad de desplazamiento, cm/s						19.59
Tiempo de retención, seg						771.82
Longitud de transición, m						0.23
<b>Estructura de Aforo</b>						
Tirante hidráulico, m				0.19		0.18
Caudal Medido en vertedor, en m <sup>3</sup> /s				0.022		0.019

De los resultados anteriores, el SSD ayudó en la selección de inputs (entrada de datos para el funcionamiento del SSD), donde se acompañan de la información necesaria para dar soporte a la decisión de los usuarios. Por ejemplo, si se presiona sobre el botón de información al usuario se le despliega la información necesaria para el diseño, obtenida de las diversas fuentes que ofrecen dicha información (Figura 25). Con esto se logra la eficiencia de tiempo y disminuir la incertidumbre de decisión para el usuario, debido a que no perderá tiempo en encontrar esta información. Otro caso que se le ofrece al usuario es que, dentro de un mismo proceso, tiene la posibilidad de escoger entre dos alternativas de diseño (Figura 26). Por ejemplo, dentro del proceso de desarenado se ofrece el desarenador de flujo horizontal y el desarenador aireado.

Otra adición al sistema son las figuras que representan los elementos que se están diseñando en cada proceso (Figura 27). Con esto se puede dar una idea el tomador de decisiones sobre en donde va el output que le ofrece el sistema. Y con esto le da mayor versatilidad sobre otros programas existentes en el mercado.

**ura y obtención de caud**

**de aguas domésticas y este cálculo se**

**onar los datos o ser calculados a través d**

No ▾

150 **l/hab \*dia**

80 **%**

2 ▾

**Con él un margen de seguridad previendo las aportaciones por concepto de aguas pluviales domiciliarias o bien, negras producto de un crecimiento demográfico explosivo. Estos valores varían de 1 a 2. En los casos en que se diseñe la ampliación de un sistema existente de tipo combinado, previendo las aportaciones extraordinarias de origen pluvial, se podrá usar un coeficiente de seguridad de 1.5. En caso de que el alcantarillado sanitario sea separado del Alcantarillado pluvial, El coeficiente de seguridad es igual a 1. .**

**Comision Nacional Del Agua. (27 de agosto de 2016). LIBRO 4. Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado. Marzo 1, 2018, de CONAGUA Sitio web: <http://mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf>, p 37.**

i

Figura 25. Información ofrecida por SSD

Selección de tipo de desarenador

De flujo horizontal ▾

De flujo horizontal

Aireado

Figura 26. Alternativas de diseño del SSD.

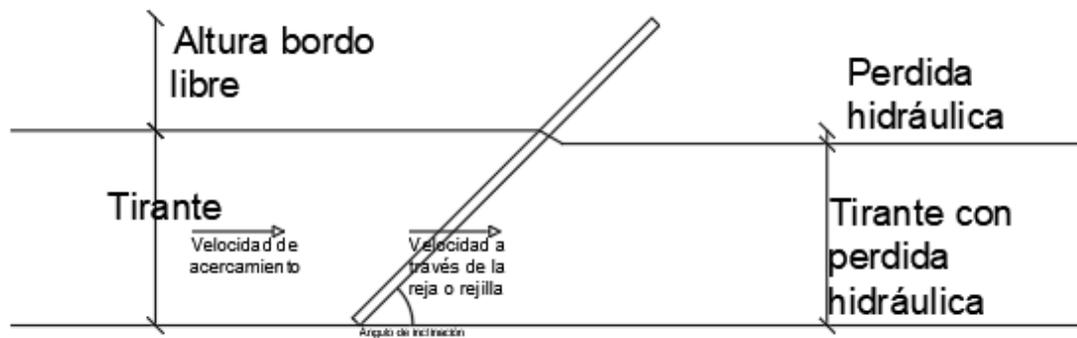


Figura 27. Diagrama de elementos de diseño en cada proceso del SSD.

### Interpretación de los resultados

El SSD desarrollado para la asistencia en el diseño del pretratamiento, en una PTAR, que es soportado a través de la web, fue determinado por el tipo de problema que resuelve en función de su grado de estructura que es definido por el usuario objetivo. Es decir que la estructura para este SSD está basada en lo que corresponde a un grado semiestructurado. El grado semiestructurado debe de cumplir con procesos específicos (datos fijos, reglas o modelos), pero la decisión pertenece al usuario. Dicho lo anterior, el SSD ofrece información y criterios que ayudan a tomar la decisión del usuario en el diseño, además tiene la capacidad de poder elegir distintas alternativas que ofrece el sistema, o bien aportar su propio criterio.

La construcción de un modelo conceptual de una PTAR permitió identificar los componentes del sistema del tren de pretratamiento, como también el poder identificar las variables y su interrelación entre las mismas. Con esto fue posible llevar a cabo la incorporación de cuáles serían los procesos unitarios que llevaría el tren pretratamiento diseñado y desarrollar el funcionamiento general del mismo.

Si se retoma el proyecto se podrá utilizar el modelo conceptual ya planteado, si esto fuera para mejorar los procesos propuestos o agregar los demás trenes de tratamiento bajo este esquema ya planteado. Si fuera el caso contrario, si se desea hacer nuevas aportaciones se deberá replantear el modelo de la PTAR.

El diseño de la arquitectura y el funcionamiento del SSD, se logró mediante la ingeniería de requerimientos, mediante la cual se desarrollaron los diagramas UML para poder comprender el funcionamiento, la estructura y dejar para futuras versiones el esquema general del entorno con el que se trabajó para esta primera versión. Además, se desarrolló el diagrama de variables y la interrelación

entre ellas, que fue parte de la ingeniería de requerimientos. Dicho diagrama aporta en gran medida el funcionamiento operacional de los procesos unitarios incluidos en esta primera versión.

Esta arquitectura y funcionamiento plateados para esta primera versión, permitirá a quien retome el proyecto, facilitarse esta fase. Sin embargo, no queda exento el mejoramiento del SSD mediante el cambio a una estructura totalmente rígida donde el usuario objetivo sea alguien totalmente inexperto o ir más allá y cambiar la estructura del SSD por una aplicación basada totalmente en diseño para los profesionales en el campo de diseño de PTAR.

El desarrollo de las funciones y scripts necesarias asociadas al diseño de los procesos de pretratamiento fue la parte que más llevo tiempo. Además, el desarrollo de capacidades lógico-matemáticas en el análisis de toma de decisiones permitió hacer uso de lenguajes de programación (Java, JavaScript, AJAX, HTML, MySQL, JQuery) para el funcionamiento del SSD. Sin embargo, abre un campo de perfeccionamiento para hacer más eficiente la programación.

El diseño de la interfaz del SSD para tener acceso por medio de web se planteó con la finalidad de hacerlo agradable y amigable con el usuario.

Aplicar el sistema de soporte de decisiones en un caso de estudio considerando una población de 5462 habitantes y con un caudal medio 7.5861 l/s, asociada a la localidad de San Cayetano Morelos, Estado de México. Demostró que la elección de alternativas de diseño fue facilitada por el SSD y dichas decisiones fueron equivalentes a las observadas en trabajos realizados por diseñaros con experiencia significativa. Además, comparando los datos obtenidos mediante el SSD con los de otros proyectos elaborados, se demostró que los resultados no varían más allá del 0.1% siendo satisfactorios.

La implementación de tecnología propia reduce los costos que pudieran ser generados por adquirir paquetes computacionales ya preestablecidos con una función específica. Esto conlleva a ventajas importantes sobre los paquetes, dentro de las que cabe destacar: bajos costos, mejoramiento continuo del sistema, facilidad de uso en cualquier dispositivo (por ser una aplicación web), los requerimientos del equipo en el que se utilice son mínimos.

## **V. CONCLUSIONES**

El SSD desarrollado para la asistencia en el diseño del pretratamiento, en una PTAR, fue determinado por el tipo de problema que resuelve en función de su grado de estructura que es definido por el usuario objetivo.

La construcción de un modelo conceptual de una PTAR permitió identificar los componentes del sistema del tren de pretratamiento, como también el poder identificar las variables y su interrelación entre las mismas.

El diseño de la arquitectura y el funcionamiento del SSD, se logró mediante la ingeniería de requerimientos, mediante la cual se desarrollaron los diagramas UML para poder comprender el funcionamiento, la estructura y dejar para futuras versiones el esquema general del entorno con el que se trabajó para esta primera versión.

El desarrollo de las funciones y scripts necesarias asociadas al diseño de los procesos de pretratamiento, permitió el desarrollo de capacidades lógico-matemáticas en el análisis de toma de decisiones mediante el uso de lenguajes de programación (Java, JavaScript, AJAX, HTML, MySQL, JQuery) para el funcionamiento del SSD.

Aplicar el sistema de soporte de decisiones en un caso de estudio considerando una población asociada a la localidad de San Cayetano Morelos, Estado de México. Demostró que la elección de alternativas de diseño fue facilitada por el SSD y dichas decisiones fueron equivalentes a las observadas en trabajos realizados por diseñaros con experiencia significativa.

Comparando los datos obtenidos mediante el SSD con los de otros proyectos elaborados, se demostró que los resultados no varían más allá del 0.1% siendo satisfactorios.

### **Recomendaciones**

Se recomienda que, para versiones futuras se incluya dentro de las operaciones unitarias del pretratamiento, el desengrasado. Esto para la inclusión de aguas residuales que contengan grasas.

También se sugiere la separación de las operaciones unitarias consideradas en esta versión. Siendo una opción más intuitiva para el usuario, el poder elegir cada operación a el diseño que considere,

Para ampliar el proyecto a una escala internacional, se deberá de incluir bases de datos de población de los distintos organismos que la emitan, para sus respectivos países.

Se propone que se le dé prioridad al enfoque modular de diseños para cada proceso de los trenes de tratamiento de aguas residuales, sin perder de vista la facilidad de uso para el usuario.

## VI. REFERENCIAS

Bagriyanik, S.; Karahoca, A., (2016). *Automated COSMIC Function Point Measurement Using a Requirements Engineering Ontology, Information and Software Technology* 72, pp. 189-203.

Cañez-Cota, A. (2015). *La gestión integrada de recursos hídricos en la política federal del agua: propuesta para la nueva Ley General de Aguas en México*, Gestión y Análisis de Políticas Públicas 13, ISSN: 1134-6035. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281538241005>

CEMDA (2006). *El agua en México: lo que todas y todos debemos saber*, Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, México, 93 p.

Comisión Nacional del Agua. (2016a). *MAPAS: Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado*. México: CONAGUA.

Comisión Nacional del Agua. (2016b). *MAPAS: Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales*. México: CONAGUA.

Comisión Nacional del Agua. (2016c). *MAPAS: Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales: pretratamiento y tratamiento primario*. México: CONAGUA.

CONAGUA (2012). *Atlas del agua en México*, SEMARNAT, México, 133 p.

Developer Mozilla (2018). *Fundamentos JavaScript*. Disponible en: [https://developer.mozilla.org/es/docs/Learn/Getting\\_started\\_with\\_the\\_web/JavaScript\\_basics](https://developer.mozilla.org/es/docs/Learn/Getting_started_with_the_web/JavaScript_basics)

Espigares García. M., Pérez López, J., (1985). *Aspectos sanitarios del estudio de las aguas*. Servicio de Publicaciones, Universidad de Granada, España.

Fonseca, C.; Hidalgo, V.; Díaz-Delgado, C.; Vilchis-Francés, A.; Gallego, I., (2017). *Design of optimal tank size for rainwater harvesting systems through use of a web application and geo-referenced rainfall patterns*, *Journal of Cleaner Production* 145, pp. 323-335.

García-Pulido. D., (1999). *Planta experimental de tratamiento de aguas residuales por medios biológicos*, Tesis para el grado de maestría, UAEMex, México, 233 p.

Jiménez-Hernández, E.; Orantes-Jiménez, S., (2012). *Metodologías híbridas para desarrollo de software: una opción factible para México*, *Revista Digital Universitaria* [en línea] 13(1) [Consultada: 2 de enero de 2012]. Disponible en: <http://www.revista.unam.mx/vol.13/num1/art16/index.html>

Metcalf & Eddy, (1991). *Wastewater engineering, treatment, disposal and reuse*, McGraw-Hill. Singapore. 1334 p.

Metcalf y Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. 3th ed. McGraw-Hill, Madrid.

Metcalf y Eddy. (2003). *Waste engineering: treatment and reuse*. 4th ed. McGraw-Hill, Nueva York. 1819 p.

Power, D. J., (1998). *Web-based Decision Support Systems. DSstar, The On-Line Executive Journal for Data-Intensive Decision Support*, Vol. 2, Nos. 33 and 34.

Ramalho, R., (1990). *Tratamiento de aguas residuales*. Reverté., España.

Ramalho, R., (1990). *Tratamiento de aguas residuales*. Reverté., España, 705 p.

Sánchez-Ramírez, J.; Mejía-Fajardo, A., Amorocho Cruz, C., (2015). *Software de Ingeniería Especializado en el Diseño y Simulación de Plantas de Tratamiento de Agua Residual: Revisión*. *Revista Ingeniería y Región* 13(1), pp 57-71.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2012). *Fichas técnicas: Obras de Excedencia*. México: SAGARPA.

Turban, E., Aronson, J., Liang, T. P., (2005). *Decisión Support Systems and Intelligent Systems.*, 7° Edición, Editorial Prentice Hall, pp.936.

United Nations (2006) *El agua, una responsabilidad compartida*, UNESCO, Francia, 584 p.

Water Environment Federation. (1992). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants: Volume 1 ASCE-Manuals And Reports On Engineering*. McGraw-Hill, New York.

Water Environment Federation. (2010). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants: WEF Manual of Practice No. 8 ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 76*, 5th ed. McGraw-Hill, New York.

Water pollution Control Federation. (1985). *Clarifier Design. Manual of practice FD-8*. USA. World Composition Services, Inc.

Zambrano Pérez. C., Saltos Arteaga. X., (2009). *Diseño del sistema de tratamiento para la depuración de las aguas residuales domésticas de la población San Eloy en la provincia de Manabí por medio de un sistema de tratamiento natural compuesto por un humedal artificial de flujo libre*. Tesis de grado. Facultad de ingeniería en ciencias de la tierra, ESPOL, Ecuador.

## **VII. ANEXOS**

Se incluyen en CD junto con los archivos de implementación informática.



Universidad Autónoma del Estado de México  
UAEM

Toluca, México a 23 de mayo de 2018.

Espacio Académico, Subdirector Académico, Coordinador de Programa  
Presente

### Carta de autorización para publicación en el RI

**Declaración de autoría original, libre de embargo, susceptible de ser depositado en el Repositorio Institucional y solicitud de evaluación de grado.**

Quien firma al calce, declaro bajo protesta de decir verdad que soy el(la) autor(a) de la obra (tipo de obra) Trabajo Escrito titulada (título de la obra) DESARROLLO DE SISTEMA DE SOPORTE DE DECISIONES PARA EL DISEÑO DEL PRETRATAMIENTO EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ASISTIDO POR WEB

y estoy de acuerdo con la totalidad de su contenido, manifiesto mi conformidad y mi autorización para que se publique en Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma del Estado de México, con fines académicos y culturales en formato de acceso abierto, en los términos del Reglamento de Acceso Abierto, la Normatividad vigente emitida por la Institución y las legislaciones aplicables en la materia.

Así mismo, declaro que responderé de la autoría y originalidad de la obra de mérito y del ejercicio pacífico de los derechos que autorizo en este acto, manifiesto que no existe otra persona física o moral a la que pertenezca; por lo cual libero de toda responsabilidad a la Universidad Autónoma del Estado de México de cualquier demanda o reclamación que llegara a formular alguna persona física o moral que se considere con derecho sobre la obra, asumiendo todas las consecuencias legales y económicas a que hubiera lugar.

De igual forma permito que la Oficina de Conocimiento Abierto perteneciente a esta Máxima Casa de Estudios, realice lo propio para el almacenamiento, preservación y difusión de la obra, con fines académicos y culturales en formato de acceso abierto y sin fines de lucro.

Firmo de conformidad y bajo protesta de decir verdad

Nombre y firma: Brandon Cereceda Silva  
No. de cuenta: 0813062

Conozco y acepto los términos de privacidad de la Universidad Autónoma del Estado de México  
[http://web.uaemex.mx/avisos/Aviso\\_Privacidad.pdf](http://web.uaemex.mx/avisos/Aviso_Privacidad.pdf)